



Moduulirakentaminen

Citation

Sorri, J. (Toimittaja) (2013). Moduulirakentaminen: Teräskennoteknologian mahdollisuudet. (Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennustuotanto ja -talous. Raportti; Vuosikerta 14). Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos.

Year

2013

Version

Publisher's PDF (version of record)

Link to publication

[TUTCRIS Portal \(http://www.tut.fi/tutcris\)](http://www.tut.fi/tutcris)

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright, please contact cris.tau@tuni.fi, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos.
Rakennustuotanto ja -talous. Raportti 14
Tampere University of Technology. Department of Civil Engineering.
Construction Management and Economics. Report 14

Jaakko Sorri (toim.)

Moduulirakentaminen: teräskennoteknologian mahdollisuudet



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TEKIJÄT

Heli Bach, Markku Hedman, Markku Heinisuo, Juhani Heljo, Jyri Joutsu, Timo Kalema, Ilona Karjalainen, Sini Kotilainen, Kalle Kähkönen, Juuso Lahdenmaa, Mari Matomäki, Hanna Mielismäki, Janne Mäki, Jukka Rannisto, Jaakko Sorri

CONCELLS -hanke

Kennorakenteiden kaupalliset ratkaisut talonrakentamisessa
Innovative Modular Cell Design for Residential and Renovation Applications

CONCELLS -HANKKEEN VASTUULLINEN JOHTAJA

Kalle Kähkönen

ULKOASU JA TAITTO

Jonna Heikkinen

PAINO

Tamper Print, Tampere 2013.

ISBN 978-952-15-3035-7 (sid.)

ISBN 978-952-15-3036-4 (PDF)

ISSN 1797-8904

JAAKKO SORRI (TOIM.)

MODUULI- RAKENTAMINEN:

TERÄSKENNOTEKNOLOGIAN MAHDOLLISUUDET

Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos
Tampere 2013

ESIPUHE

Kalle Kähkönen, TTY

Tämä kirja esittelee Concels-tutkimusprojektissa muodostettua uutta tietämystä modulaarisesta rakentamisesta. Hankkeessa on kehitetty edelleen FIXCEL®-teknologiaa sekä tuotu teräskennotutkimusta ja -opetusta korkeakoulutasolle. Hankkeessa on tutkittu monipuolisesti FIXCEL-teräskennoihin liittyviä haasteita ja tiedon tarpeita. Näitä ovat olleet modulaariseen rakentamiseen liittyvät arkkitehtoniset mahdollisuudet, rakennetekniset kysymykset, talotekniset ratkaisut, kilpailutekijät suhteessa perinteiseen rakentamiseen, elinkaarikustannukset sekä moduulirakennushankkeen toteutuksen erityispiirteet.

FIXCEL-kennorakenne on laivanrakennusalalla alkunsa saanut innovaatio. NEAPO Oy on perustettu hyödyntämään tätä teknologiaa rakennusalalla. FIXCEL-teräskennot valmistetaan kuumasinkityistä teräsprofiileista. Rakenteen etuna on keveys ja jäykkyys. Teräskennoelementeistä koetaan asunnon kokoisia moduuleita, joista rakennetaan edelleen modulaarisia rakennuksia. Teräskennorakenteinen moduulitalo on uudenlainen runkorakennejärjestelmä. Moduulin seinät, alapohja ja yläpohja ovat FIXCEL-teräskennoa. Moduulit voidaan sisätilojen osalta esivalmistaa tehtaalla hyvin pitkälle valmiiksi.

Concels-hanke on ollut uudentyyppinen rinnakkaishanke, johon on kuulunut neljä erillistä yrityshanketta sekä Tampereen teknillisen yliopiston tutkimushanke. Mukana olleita yrityksiä ovat olleet NEAPO Oy, Arkkitehtitoimisto Hedman & Matomäki Oy, Ramboll Finland Oy sekä Suunnittelulinja Finland Oy. Hanke on toteutettu 1.10.2011–31.3.2013. Tekes on osallistunut hankkeen rahoittamiseen. Tohtori Olli Vuola toimi keskeisenä osajana Concels-hankkeen muodostamisessa ja aloittamisessa.

Concels-hankkeen johtoryhmän työskentelyyn ovat osallistuneet Ari Ahonen (RYM SHOK Oy), Janne Mäki (Suunnittelulinja Finland Oy), Vesa Hakola (Ramboll Finland Oy), Jukka Huikari (Tekes), Kalle Kähkönen (Tampereen teknillinen yliopisto), Mari Matomäki (Arkkitehtitoimisto Hedman & Matomäki Oy) ja Risto Rautio (NEAPO Oy). Esitän lämpimät kiitokset kaikille hankettamme toteuttaneille ja tukeneille osajille sekä heidän edustamille organisaatioille.

Toivon, että tämä kirja osaltaan tuo esille ja edistää niitä ajatuksia ja ratkaisuja, joiden kautta rakennus- ja kiinteistöala voi kehittyä uudelle tasolle.

Tampereella 15.2.2013

Kalle Kähkönen

SISÄLTÖ

ESIPUHE	2
Kalle Kähkönen, TTY	
1. JOHDANTO	6
Jaakko Sorri, Kalle Kähkönen ja Jukka Rannisto, TTY	
2. ARKKITEHTUURI	10
Markku Hedman ja Sini Kotilainen, TTY	
3. RAKENTEET	26
Markku Heinisuo ja Juuso Lahdenmaa, TTY	
4. TALOTEKNIikka	52
Timo Kalema ja Jyri Joutsu, TTY	
5. TOTEUTUS	
5.1. Modulaarisen rakentamisen mahdollisuudet vuokra-asuntomarkkinoilla	58
Jukka Rannisto, TTY	
5.2. Modulaarinen rakentaminen yritysverkoston toteuttamana	64
Jaakko Sorri ja Kalle Kähkönen, TTY	
5.3. Elinkaarinäkökulma moduulirakentamiseen	70
Juhani Heljo, TTY	
6. VIRTUAALIHANKE	
6.1. Virtuaalihankeen arkkitehtoniset ratkaisut	76
Ilona Karjalainen, Mari Matomäki ja Heli Bach, Arkkitehtitoimisto Hedman & Matomäki Oy	
6.2. Virtuaalihankeen talotekniikan suunnitteluratkaisut	84
Janne Mäki, Suunnittelulinja Finland Oy	
7. ESIMERKKIKOhteita	96
Hanna Mielismäki, NEAPO Oy	
8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	108
Kalle Kähkönen, TTY	
LÄHTEET	110

1. JOHDANTO

Jaakko Sorri, Jukka Rannisto & Kalle Kähkönen, TTY

Modulaarinen rakentaminen on tällä hetkellä yksi kansainvälisesti kiinnostava rakennusalan kehityssuunta (Bock et al. 2012; National Research Council 2009). Modulaarinen rakentaminen tarkoittaa pitkälle esivalmistettuihin moduuleihin perustuvaa rakennustoimintaa. Moduulit rakennetaan tehdasolosuhteissa, pyrkien hyödyntämään tehdasvalmistukseen liittyviä tehokkuusetuja. Näin työvaiheita saadaan siirrettyä työmaalta työn tekemisen kannalta suotuisampiin olosuhteisiin. Tehdasolosuhteissa toimittaessa ollaan suojassa vesi-asteiden, lumen ja kylmyyden aiheuttamilta ongelmilta.

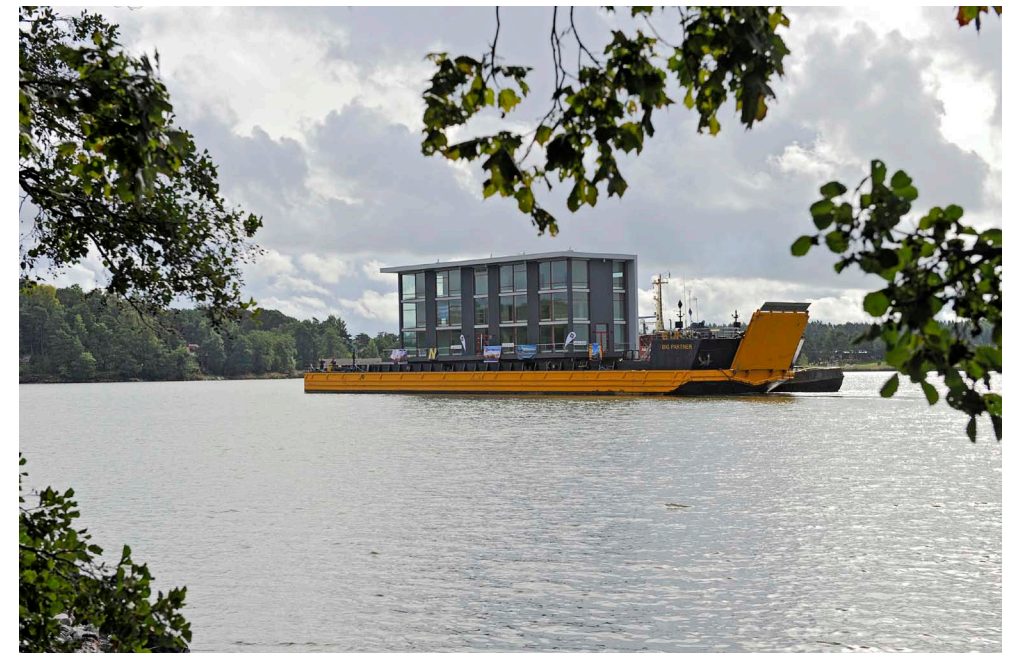
Rakentamisen tuottavuuden kohottaminen uudelle tasolle on nähty ehkä lupaavimpana moduulirakentamisen tuomana mahdollisuutena. Tämä voi tarkoittaa käytännössä kokonaisratkaisua, jossa irrottautaan kaikista rajoittavista perinteisistä ajattelumalleista, toimintatavoista ja tuotteista. Näin voidaan löytää elintilaa täysin uusille toimintatavoille sekä niiden eduille. Irтіotto perinteisen rakentamisen rajoitteista, johon voi liittyä myös uuden tai jopa uusien ammattikuntien luominen, olisi koko alaa uudistava kokonaisuus. Perinteisen rakentamisen rajoitteet ovat selvästi vaikeuttaneet teollisen rakentamisen ja moduulirakentamisen laajamittaista hyödyntämistä. Samalla näiden edut ovat paljolti jääneet toteutumatta.

Modulaarisen rakentamisen juuret ulottuvat ainakin 1900-luvun alkupuolelle. Modulaarisen rakentamisen on nähty olevan yksi sellainen aihealue, jossa muutosten aikaansaaminen on ollut hidasta (Lovell & Smith 2010). Suurimmat syyt moduulirakentamisen suosion kasvun hitauteen ovat aiemmin liittyneet usein teknisiin ongelmiin, asiakkaiden tarpeiden huomiotta jättämiseen ja korkeisiin kustannuksiin (Jokimäki 2009). Modulaarinen rakentaminen on kuitenkin vähitellen saanut jalansijaa yhtenä rakentamisen muotona niin Japanissa kuin Euroopassakin (Gann 1996; Linner & Bock 2012). Suomessa rakentamisen esivalmistusastetta on nostettu mm. elementtirakentamisen kautta, mutta pidemmälle menevä modulaarinen rakentaminen on ollut tähän asti kerrostalokohteissa vähäistä.

Aiemmin julkaistuissa tutkimuksissa modulaarisen rakentamisen merkittävimpinä etuina on nähty:

- Rakentamisajan nopeus – keskimäärin 30–60 prosenttia lyhyempi rakentamisaika (Modular Building Institute 2012; Lawson & Ogden 2010; Boyd et al. 2012)
- Ekologisuus – tehokkaamman materiaalinkäytön ja materiaalien paremman kierrätyksen vuoksi kaatopaikkajätteen määrä on vähentynyt jopa 70–100 prosenttia (Lawson & Ogden 2010; Pan & Goodier 2012; Hartley & Blagden 2007; Quale et al. 2012).
- Kontrolloidun tehdasrakentamisen tuottama laatu – hyvät ja tasaiset työskentelyolosuhteet, vakioidut työvaiheet ja laadunvalvonnan helpottuminen mahdollistavat virheettömämmän ja kosteusvauriottoman lopputuloksen (National Research Council 2009; Pan & Goodier 2012; Boyd et al. 2012)
- Kustannusten ja aikataulun parempi ennustettavuus (Pan & Goodier 2012)
- Mahdollisuus alhaisempiin kokonaiskustannuksiin – selkeitä säästöjä voidaan saavuttaa esimerkiksi pienempien pääomakustannusten, aikaisempien tuottojen sekä alhaisempien suunnittelukustannusten ansioista (Boyd et al. 2012; Lawson & Ogden 2010)
- Turvallisuus- ja terveysriskien väheneminen (Pan & Goodier 2012; Lovell 2003)

Siirrettävä kerrostalo, NEAPO Oy. Kuvaaja: Jouni Saaristo.



Modulaarisen rakentamisen merkittävimpiä heikkouksina on puolestaan nähty:

- Muutosten tekeminen ja projektin keskeyttäminen voi olla vaikeaa ja työmaalla rakentamista kalliimpaa (Pan & Goodier 2012; Gorgolewski et al. 2001; Boyd et al. 2012)
- Moduulien kuljetus työmaalle rajoittaa niiden kokoa ja voi olla hankalaa ja kallista (Boyd et al. 2012; Blismas & Wakefield 2007)
- Modulaarisen rakentamisen kokeiluista aikoinaan jäänyt maine (Blismas & Wakefield 2007; Johnson 2007; Pan & Goodier 2012)
- Mielikuvat siitä, että modulaarisella vaihtoehdolla ei voisi vastata asiakkaan toiveisiin (Boyd et al. 2012; Blismas & Wakefield 2007)
- Erilaisten standardien ja vakioitujen toimintatapojen puute (Boyd et al. 2012; Blismas & Wakefield 2007)
- Liian raskaat, rajoittavat ja kalliit viranomaismääräykset (Blismas & Wakefield 2007)

Tietyt projektin ominaispiirteet voivat sopia erityisen hyvin modulaariseen rakentamiseen kun taas toiset ominaisuudet ovat modulaariselle rakentamiselle epäedullisempia. Modulaarista rakentamista kannattaa harjoittaa erityisesti sellaisissa kohteissa, joissa sen edut korostuvat. Ominaispiirteitä, jotka suosivat modulaarista rakentamista ovat aikaisempien selvitysten mukaan mm. seuraavat:

- Samanlaisten rakennusten, asuntojen tai huoneiden suuri määrä, minkä ansiosta mittakaavaetuja voidaan saavuttaa suunnittelussa ja tuotannossa
- Huonot pohjaolosuhteet, jotka suosivat kevyempiä rakennuksia
- Ahdas työmaa-alue ja vilkas ympäröivä liikenne
- Työmaahan kohdistuvat melu-, saaste-, aikataulu- yms. rajoitukset
- Lisärakentaminen erityisesti rakennusten katoille
- Pyrkimys mahdollistaa kohteen siirto tai laajentaminen tulevaisuudessa (National Audit Office 2005; Gorgolewski et al. 2001)

Modulaarisesta rakentamisesta hankalia tekeviä ominaispiirteitä ovat puolestaan:

- Epätavalliset ja monimuotoiset rakennus- ja asuntopohjat, joissa ei ole toistuvuutta
- Myöhäinen urakoitsijan valinta; jos suunnitelmia ei ole tehty alusta asti modulaarista tuotantoa silmällä pitäen, modulaarinen toteutus voi olla vaikeaa
- Myöhäiset suunnitelmamuutokset
- Halu pitää projektin keskeyttäminen mahdollisena mahdollisimman pitkään (National Audit Office 2005; Gorgolewski et al. 2001)

Modulaarisen rakentamisen etuja ja haasteita voidaan tarkastella joko tuotannon tai rakennusten loppukäyttäjien näkökulmasta. Tuotannollisesta näkökulmasta kiinnostavia teemoja ovat usein esimerkiksi kustannus- ja tuottoasiat, laatu, toimintatavat ja riskien hallinta. Edellä luetellut ominaispiirteet edustavat pääasiassa juuri tuotannollista näkökulmaa, kuten rakentamisen aikaisia asioita. Loppukäyttäjille tuotannolliset asiat ovat merkityksellisiä yleensä vain silloin, jos niillä on seurauksia rakennuksen tai asunnon kustannuksiin, käytettävyyteen tai visuaaliseen ilmeeseen.

Arkkitehtuuri voi olla yksi mahdollinen asia, jonka kautta modulaarinen rakentaminen voi saavuttaa omaleimaisuutta. Kirjan seuraava luku käsittelee modulaariseen rakentamiseen liittyviä arkkitehtonisia mahdollisuuksia. Teräskennorakenteisiin on liittynyt monenlaisia rakenteellisia kysymyksiä. Kolmannessa luvussa esitellään Concels-hankkeessa tehtyjen rakennetutkimusten tuloksia. Kirjan neljännessä luvussa aiheena ovat talotekniikkaan liittyvät erityispiirteet. Viidennessä luvussa käsitellään moduulirakentamisen menestystekijöitä, jo toteutetuista moduulirakentamisprojekteista tehtyjä havaintoja sekä moduulirakentamiseen liittyviä elinkaariasioita. Kuudennessa luvussa esitellään virtuaalisen suunnitteluhankkeen tuloksia. Tässä Concels-projektin osassa suunniteltiin kuvitteellinen rakennus, johon pyrittiin kokoamaan avoimena olleita kysymyksiä ja löytämään niihin ratkaisuja suunnittelijoiden yhteistyössä. Virtuaalirakentamishanketta esitellään kirjassa arkkitehtitoimisto Hedman & Matomäen sekä Suunnittelulinja Finland Oy:n toimesta. Seitsemännessä luvussa esitellään, millaisia kohteita moduulirakentamisella on toteutettu käytännössä Neapo Oy:n toimesta. Kirjan päättää yhteenvetoluku.

2. ARKKITEHTUURI

Markku Hedman ja Sini Kotilainen, TTY

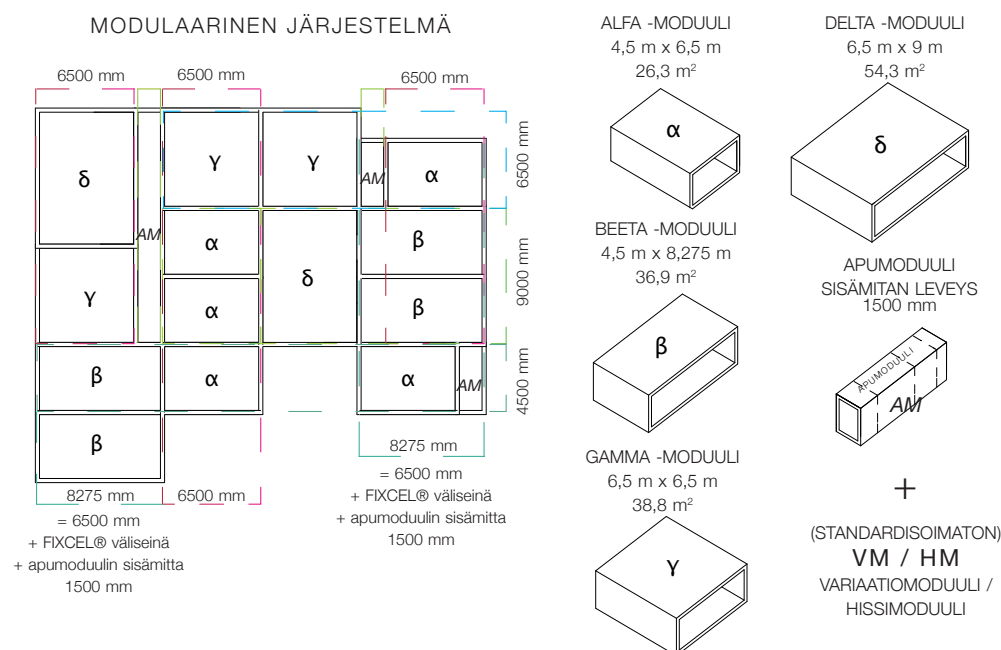
2.1. Ratkaisumalleja modulaariseen asuntorakentamiseen

Tampereen teknillisen yliopiston Arkkitehtuurin laitoksella tehdyssä tutkimustyössä etsittiin modulaariseen monikerrosrakentamiseen sisältyviä mahdollisuuksia, joilla voidaan monipuolistaa nykyistä asuinrakennustypologiaa sekä kehittää vetovoimaisia, joustavia ja asukaslähtöisiä kaupunkiasumisen ratkaisuja. Tämän ajan suomalainen kerrostalorakentaminen on sekä talotyyppöjen että asuntoratkaisujen osalta monotonista. Tulevaisuudessa erilaistuvat asukkaat ja asumisen tavat luovat painetta asumisen vaihtoehtojen monipuolistumiseen ja asukaslähtöisyyden huomioon ottamiseen. (Lahti ym. toim. 2007.) Erottautumisen tarve on mahdollista nyt, kun asumisessa on ohitettu perustarpeiden tyydyttäminen vaurastumisen myötä. (Ilmonen 2007, 10.) Samalla kun Suomessa keskimääräinen varallisuus kasvaa, myös tuloerot kasvavat. (Ruotsalainen 2011, 9.) Erilaistuminen asumisessa voi pahimmassa skenaariossa tarkoittaa asukkaiden eriarvoistumista ja väestön erilaisia mahdollisuuksia toteuttaa asumistarpeita ja -toiveita. Modulaarinen rakentaminen tapahtuu tehdasolosuhteissa, jolloin pyritään hyödyntämään teolliseen valmistukseen ja sarjatuotantoon liittyviä tehokkuusetuja. TTY:n Arkkitehtuurin laitoksen tutkimus osoittaa standardoitujen moduulien teolliseen sarjatuotantoon sisältyvän potentiaalın tuottaa asukaslähtöistä ja monimuotoista arkkitehtuuria. Sarjatuotanto voidaan toteuttaa sarjajärjestelmällä, jossa osa moduulien piirteistä vaihtelevat moduulista toiseen, mutta tietyt piirteet ovat samat. Sarjajärjestelmällä vakiomodulien avulla voidaan luoda pienessä mittakaavassa yksilöllistyyviin asumistarpeisiin varioituvia asuntoja ja suuressa mittakaavassa erilaisten rakennuspaikkojen mukaan varioituvia talotyyppöjä. Modulaarisella rakentamisella on potentiaalia luoda samassa hintaluokassa erilaisia asumisen vaihtoehtoja, joka myös minimoi erilaistuvan asumisen mahdollisia haittapuolia.

TTY:n Arkkitehtuurin laitoksen tutkimuksen vastuullisena johtajana toimi professori Markku Hedman. Tässä luvussa esitetyt ratkaisut esitellään perusteellisemmin julkaisussa: *Moduulirakentaminen, Ratkaisumalleja tulevaisuuden asuntorakentamisen haasteisiin*. (Kotilainen 2013). Tämän luvun yhteydessä tutkimus viittaa edellä mainittuun julkaisuun. Tiia Ruutikainen työsti modulaarisen rakentamisen asuntosuunnittelun tutkielmia Concells -hankkeen oheisessa diplomityöohjelmassa. Ruutikaisen (2013) diplomityössä *Kennosta kodiksi, Tutkielmia moduulirakenteisista asuinkerrostaloista* tutkitaan suunnittelututkielmien avulla, miten moduulirakenteisia asuinkerrostaloja voidaan muodostaa.



Concells -tutkimuskokonaisuudessa Tampereen teknillisen yliopiston Arkkitehtuurin laitoksen tutkimustyö koostui (1) modulaarisen rakentamisen yhteiskunnalliseen toimintaympäristöön ja asumisen muutokseen keskittyvästä analyysistä, (2) modulaarisen rakentamisen typologiakirjaston suunnittelustrategioiden ja niihin liittyvien suunnittelutyökalujen luomisesta sekä (3) kokeellisten suunnitteluesimerkkien suunnittelusta.



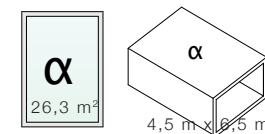
Modulaarinen järjestelmä koostuu pääosin neljästä vakiokokoisesta perusmoduulista: alfa-, beeta-, gamma- ja deltamoduulista. Näiden lisäksi järjestelmä pitää sisällään tontin mukaan räätälöitävän moduulin eli ns. variaatiomoduulin. Yksilöllinen variaatiomoduuli hyödyntää koko järjestelmän sopeutuvuutta erilaisiin rakennuspaikkoihin. Lisäksi käytetään apumoduulia, joka on variaatiomoduulin ja neljän standardoidun perusmoduulin välimuoto: leveydeltään vakio, mutta pituudeltaan vakioimaton.

2.2. Modulaarinen järjestelmä

Tutkimusprosessissa kirjallisuuskatsaukseen perustuva teoreettinen pohdinta ja modulaarisen asuntorakentamisen ratkaisumallien kehittämiseen pyrkivä suunnittelutyö ovat vuorotelleet. Kokeellisten talotyyppitutkimien ja asuntoratkaisuiden suunnittelua varten muodostettiin modulaarinen järjestelmä, joka osoittaa, ettei modulaarisen rakentamisen järjestelmiä välttämättä tarvitse luoda talotyyppikohtaisesti tai tonttikohtaisesti. Moduulijärjestelmässä yksittäisten moduulien tulee olla yhdisteltäviä. Yhteensopivuus saavutetaan asettamalla moduuliyksiköille tiettyjä mitta- ja muotomääreitä. Tämän hetkisen modulaarisen rakentamisen valmistus- ja myyntiteknisistä syistä tutkimuksen modulaarisessa järjestelmässä rajoitetaan pääosin monitahokkaisiin, joiden leikkaus- ja pohjamuoto on suorakaide.

Modulaarisen järjestelmän tarkoituksena ei ole esittää yhtä oikeaa modulaarista mittamaailmaa tai moduulimallistoa, vaan osoittaa yhden esimerkin avulla, mitä mahdollisuuksia tai haasteita modulaariseen asuntorakentamiseen sisältyy.

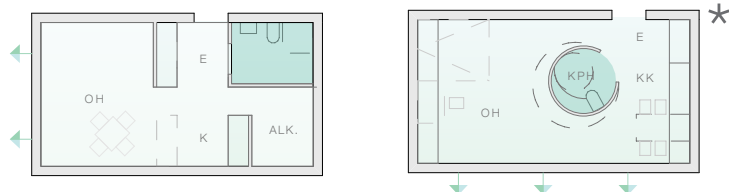
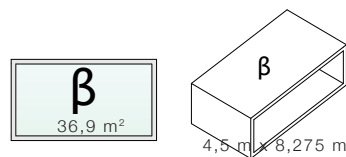
ASUNTO α -MODUULIN SISÄLLÄ, ESIMERKIT 1:200



ESIMERKKEJÄ ASUNNOISTA, JOSSA α -MODUULI OSANA 1:200



ASUNTO β -MODUULIN SISÄLLÄ, ESIMERKIT 1:200



β -MODUULIN KAPEUS LUO HAASTEITA SEN ITSENÄISEEN KÄYTTÖÖN. β -MODUULI ON LUOTU ENSISIJAISESTI ITSENSÄ JA MUIDEN KANSSA YHDISTELTÄVÄKSI.

ESIMERKKEJÄ ASUNNOISTA, JOSSA β -MODUULI OSANA, ESIMERKIT 1:200



★
 TYPOLOGIATUTKIELMISSA KESKITÄÄN TARKOITUKSELLISESTI VAKIOITAVAN SUORAKULMAISEN MÄRKÄTILAN AVULLA SUUNNITELTUJIN ASUNTORATKAISUJIN. TULEVISSA TUTKIMUKSISSA ASUNTOTUTKIELMIEN SKAALAA VOIDAAN LAAJENTAA MUIHIN, LUOVIIN RATKAISUIHIN.

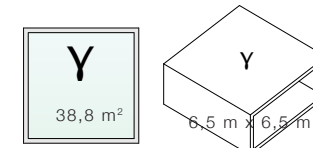
2.3. Suunnittelustrategiat viitoittavat typologiakirjaston ratkaisuja

Tutkimuksessa etsittiin moduulirakentamisen lainalaisuuksiin sopivia tapoja vastata asumisen muutos- ja tulevaisuusnäkyymiin. Tapoja tuotiin esille suunnittelustrategioiden kautta. Seuraavassa listataan lyhyesti näitä suunnittelustrategioita, jotka toimivat modulaarisen asuntorakentamisen tyyppitutkielmien suunnittelua ohjaavina polkuina. Julkaisussa *Moduulirakentaminen, Ratkaisumalleja tulevaisuuden asuntorakentamisen haasteisiin* suunnittelustrategioiden alle on lisäksi jäsennelty suunnittelutyökaluja. Tietyn suunnittelustrategian tai -työkalun valitseminen ei johda samaan lopputulokseen, sillä itse suunnitelma on aina yksilöllinen. Asumisen ajankohtaisiin haasteisiin ei voida vastata ainoastaan nykyisiä asuntorakentamisen ratkaisumalleja kehittämällä. Sen johdosta tutkimuksen tavoitteena on ollut kehittää tulevaisuuden asuntorakentamisen kannalta relevantteja uusia ratkaisuja.

2.3.1. Suunnittelustrategiana talotypologian monimuotoistaminen ja joustavuus julkisesta tilasta yksityiseen tilaan

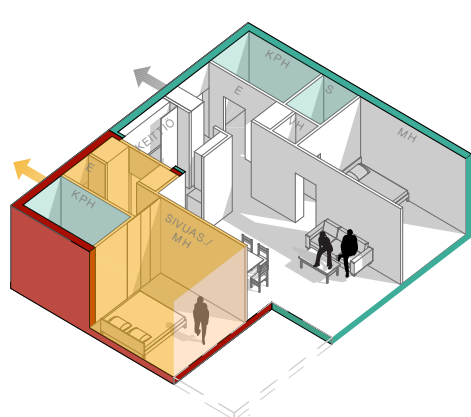
Niin väestörakenteen, ajankäytön kuin elämän- ja asumistapojen muutoksetkin korostavat monipuolisemman asumisen vaihtoehtojen merkitystä tulevaisuudessa. Siksi taustalla vaikuttavana suunnittelustrategiana on kaupunkimaisen monikerrosrakentamisen talotypologian monimuotoistaminen.

Kaupunkiasumisessa tiheimmän yhdyskuntarakenteen vaatimukset sitovat asumista ja kaupunkiympäristöä yhä tiiviimmin toisiinsa. Asumisen kokonaisvaltaisessa käytettävyydessä asumisen reviiiri hahmotetaan asunnon tasoa laajempaan tilojen ja toimintojen moniulotteisena kudelmana. Asuin ympäristössä paradoksaalisesti tärkeitä ovat heikot sosiaaliset suhteet, jotka perustuvat arkipäiväisen tilan toistuvaan jakamiseen. (Juntto 2008, 13.) Parhaimmillaan puolijulkisessa tilassa tapahtuvat heikot sosiaaliset kontaktit sekä lähiyhteisön spontaani tapaaminen ja yhdessäolo monipuolistavat asumisen kokemuksellista sisältöä. (Hasu 2009, 145–148.) Esimerkiksi Prezzan ym. (2001) mukaan asuin ympäristön lähikontaktien on huomattu olevan käänteisessä yhteydessä yksinäisyyden kokemuksiin ja lisäävän subjektiivista hyvinvointia ehkäisemällä yksinäisyyttä. Pienimittakaavaisista moduuleista koostuva rakentaminen tarjoaa runsaasti muodonannollisia mahdollisuuksia asuin ympäristöihin, jossa yksityinen ja julkinen tila liukuvat toistensa lomaan huokoisten puolijksityisten ja -julkisten tilojen kautta. Yksi tärkeimmistä suunnittelustrategioista on kohtaamisia synnyttävän ja elinreviiriä laajentavan huokoisen tilasarjan luominen yksityisestä julkiseen.

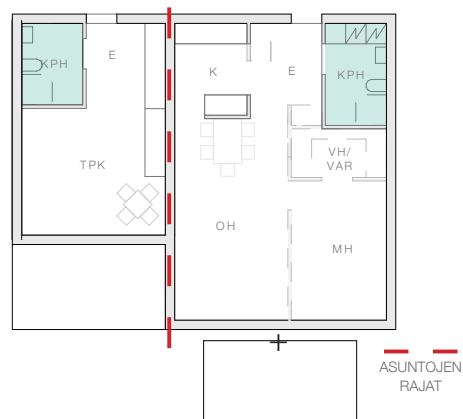


2.3.2. Suunnittelustrategiana muunneltavat asutkokonaisuudet

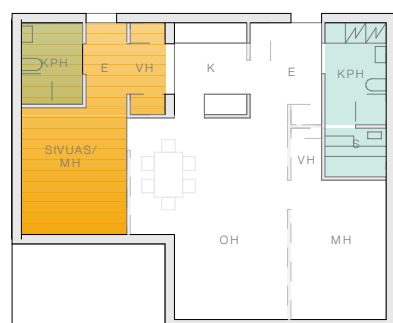
Suomalaisen yhteiskunnan demografisten muutosten sekä asutokuntien määrään ja kokoon liittyvien muutosten vuoksi modulaarisen rakentamisen typologiakirjastossa keskitytään muunneltavien asutkokonaisuuksien mahdollisuuksiin. Samassa asunnossa pysyvästi asuvien henkilömäärä on pienentynyt jo pitkään hyvin tasaisesti ja erityisesti yksinasuminen on kasvussa. (Suomen virallinen tilasto (SVT): Asunnot ja asuinolot 2010.) Lisäksi tulevaisuudessa perhemallien monimuotoisuus kasvaa. (Esim. Kukko 2006, 38 ja Nätkin 2003.)



PIENASUNTO JA KAKSIO



3H+K (SAUNA), JOSSA SIVUASUNTO TAI LISÄOSA ETÄTYÖHÖN/HARRASTUKSIIN



3-4H+K (SAUNA)



Esimerkki muunneltavasta asutokoosta. Kahden asunnon kokonaisuus muuttuu kohtuullisilla muutoksilla kolmen makuuhuoneen perheasunnoksi tai kahden makuuhuoneen asunnoksi, jossa toinen makuuhuone voi toimia sivuasuntona, työ- tai harrastustilana.

ASUNTO YHDEN Y-MODUULIN SISÄLLÄ, ESIMERKIT 1:200



ESIMERKKEJÄ ASUNNOISTA, JOSSA Y-MODUULI OSANA, ESIMERKIT 1:200



ESIMERKKI MONIKÄYTTÖISESTÄ ASUNNOSTA



ESIMERKKI MUUNNELTAVASTA ASUNNOSTA



Modulaariseen rakentamiseen sovellettavia asumisen joustavuutta lisääviä keinoja. Ylhäällä Ilosen ym. (2006, 56–57) kehittämästä Töölöläisasunnon konseptista johdettu monikäyttöisyyteen perustuva moduulijärjestelmällä toteutettava joustavan asunnon esimerkki. Alhaalla tekniseen muunneltavuuteen perustuva, delta-moduuliin sijoittuva joustavan asunnon esimerkki.

Moduuliyksiköiden valmistustapa ja siihen liittyvä siirto tehtaalta tontille asettaa rajoituksia moduulin fyysiselle koolle. Kuljetusmitat rajaavat moduulien maksimikoon niin, että modulaarinen rakentaminen pystyy vastaamaan erityisen hyvin pienten asuntojen suuren määrän tarpeeseen. Vaikka jopa perinteisiä kolmioita suuremmat asunnot ovat joissain tapauksissa mahdollisia yhtenä moduulina toteutettaviksi, typologiatutkielmassa luodaan ratkaisuja, joissa isommat asunnot koostuvat usein monista yksittäisistä moduuleista. Näitä yksittäisiä moduuleja on mahdollista yhdistellä tarpeen mukaan eri kokonaisuuksiksi: useiksi pienasunnoiksi tai yhdeksi perheasunnoksi.

Asunnon koon supistamista tai kasvattamista on helppo kritisoida nimittämällä se aikamme kerrostalorakentamisessa epärealistiseksi ratkaisuksi. Tutkimuksessa asuntojen koon joustavuuden mahdollisuus on haluttu nähdä kestävyyttä lisäävänä kaupunkiasumisen mahdollisuutena. Asunnon laajenemisen ja kutistumisen mahdollistama jousto ei pyri vastaamaan niinkään yhden yksilön, asukkaan tai perheen elämäntilanteen muutoksiin, vaan perherakenteiden, asumisen tapojen ja asuntokuntien koon vaihteluun pitkällä aikavälillä. Tällainen joustavuus voisi auttaa myös asuntotuottajia vastaamaan helpommin todelliseen kysyntään, kun asuntojen lopulliset koot voisi määrittää aina uudelleen todellisen tarpeen mukaisesti.

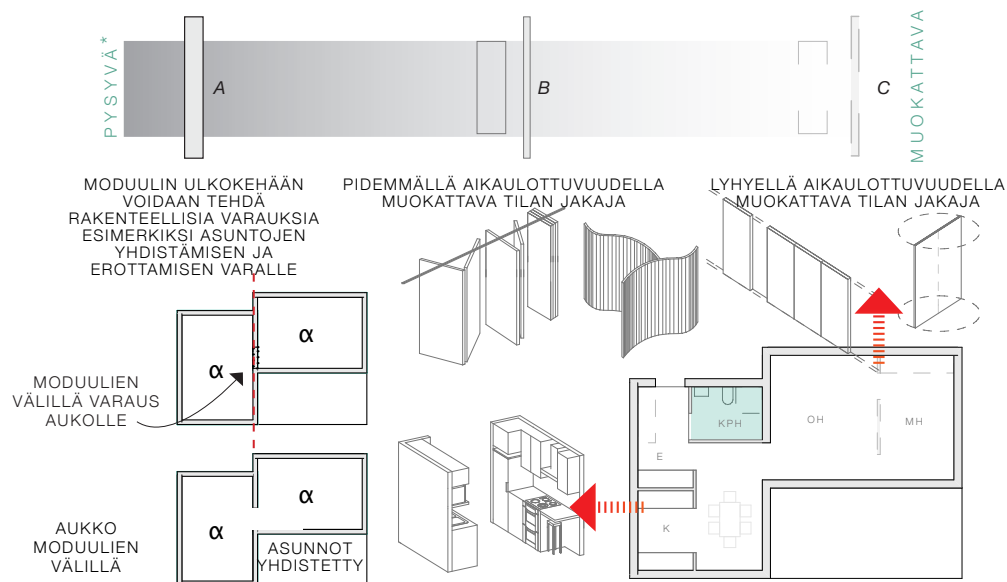
2.3.3. Suunnittelustrategiana joustavat asumisen ratkaisut

Meidän aikamme rakentamisen erityinen haaste on kestävän rakentamisen kokonaisvaltainen toteuttaminen. Modulaarisen rakentamisen kehittäminen on tämän tavoitteen saavuttamisen kannalta erityisen merkittävää. Siihen sisältyy mahdollisuuksia luoda nykyistä energiatehokkaampi, säästeliäämpi ja parempaa laatua tuottava rakentamisen prosessi. Rakentamisen kestävillä valinnoilla ja rakenteiden energiatehokkuudella voidaan kyllä vähentää energiankulutusta, mutta saatu hyöty hupenee asuntojen pinta-alojen laajentuessa (Suomen virallinen tilasto (SVT): Asunnot ja asuinolot 2011) ja asumisen muuttuessa yhä monipaikkaisemmaksi (Haukkala toim. 2011). Energiankulutuksen mittaaminen asuinkuutiota kohden on siis auttamattoman vajaavainen mittari, kun ajatellaan asumisen kokonaisuuden ympäristövaikutuksia. Energiatehokkaastikin rakennettu asuin ympäristö vaatii ekologisesti ja taloudellisesti suuria investointeja, mikäli asunnon sijainti vaatii asukkaalta laajaa päivittäistä liikkumista tai asunnon tilat eivät pysty mukautumaan elämäntilanteiden ja -tyylien muutoksiin. Asuineliöiden tarve asukasta kohden riippuu paljon siitä, mihin toimintoihin ja ratkaisuihin tuo asuineliöiden määrä asukkaan arjessa taipuu.

Siten asuntoratkaisuiden joustavuus nousee asuntorakentamisen tärkeäksi avainasiaksi. Tiurin (1997) mukaan avoimessa rakentamisessa asuinympäristö nähdään alati muuttuvana ihmisten toiminnan tuotteena, jossa muutokset tapahtuvat eri mittakaavatasoilla eri nopeuksilla. Tasoihin jakamisen taustalla on se, että muutostarve alemmalla tasolla, esimerkiksi asunnon sisällä, on usein nopeampi kuin ylemmällä tasolla, kuten rakennuksen kantavassa osassa. (Tiuri 1997.) Moduulirakentaminen noudattaa edellistä määritelmää tietyin osin. Moduulien kantavat ulkokehät (A) toimivat modulaarisessa rakentamisessa ns. ylempänä tasona, joka sallii moduulikehien sisälle jäävien tilojen ja tilojen jakavien osien (B, C) muuntomahdollisuudet. Koska jatkuva uudelleen rakentaminen kantavan moduulikehän sisällä on kestävä ratkaisu, tuodaan tutkimusjulkaisussa esiin erilaisia modulaariseen rakentamiseen sovellettavia asumisen joustavuutta lisääviä keinoja.

2.4. Modulaarinen rakentaminen tulevaisuudessa

Tulevaisuuden modulaarinen rakentaminen kulkee harhaan, jos päätepiirteenä on yhdenmukaisuutta tuottava, ratkaisuvaihtoehtoja köyhdyttävä ja käyttäjän todelliset tarpeet unohtava rakennustuotanto. Tarjolla on onneksi toinen ja otteeltaan ihmisläheisempi kehityspolku. Sen päätepiirteenä on modulaarinen rakentamistapa, joka yhdistää rakentamisen teknisiä, taloudellisia ja esimerkiksi toiminnallisia kysymyksiä käsittelevän realismin yksilöllistä kokemusmaailmaa käsittelevään idealismiin. Tämä on edellytys sille, että tulevaisuuden modulaarinen rakentamistapa voi vastata kestävä rakentamisen haasteeseen sen ekologisella, taloudellisella ja sosiaalisella tasolla.



Typologiatutkielmissa on eriytetty eri esitystekniikojen keinoin eri aikaulottuvuudella muunneltavia asunnon tilojen rajaavia osia.

ASUNTO δ -MODUULIN SISÄLLÄ, ESIMERKIT 1:200



ESIMERKKEJÄ ASUNNOISTA, JOSSA δ -MODUULI OSANA, ESIMERKIT 1:200

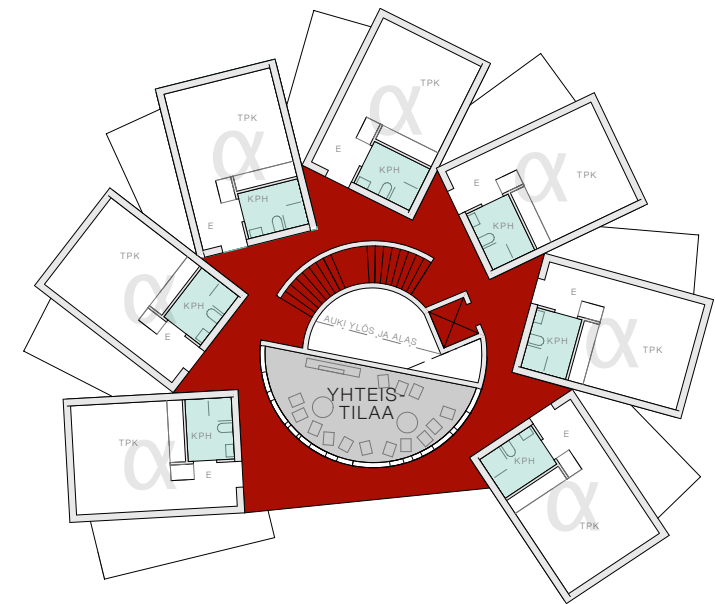




Esimerkki rakennusmassasta, joka rajaa osin asukkaiden puolijulkista pihatilaa. Käpertyvä rakennusmassa ja keskeisesti puolijulkisen pihan syyliin sijoittuva porrashuone luovat ratkaisun, jossa piha muotoutuu asuinyhteisön päivittäin käytettäväksi solmukohdaksi. Tiivis puolijulkisen pihan käyttö lisää siinä tapahtuvien sosiaalisten kontaktien määrää. Osin rajattu piha on onnistuneesti suunnattuna valoisa ja avoin. Moduulien välsiin taskuihin muodostuvien asuntokohtaisten ulkotilojen etuja ovat yksityisyys ja suojaisuus. Rakennusmassan terassoinnilla mahdollistetaan osalle asunnoista itsenäinen, yksityinen pihaporras.

Kun rakennus reunustaa vain osittain puolijulkista pihaa, raja julkiseen kaupunkitilaan on rajaamaton ja yksityisyyden puutteesta saattaa tulla puolijulkisen pihatilan käyttöä häiritsevä tekijä. Pihan rajaaminen esimerkiksi materiaalivaihteluilla, korkovaihteluilla tai istutuksilla voi riittää antamaan sille yksityisen luonteen. Valo-olosuhteiden riittävyys kaikkiin asuntoihin on varmistettava onnistuneella suuntauksella.

Esimerkkejä typologiakirjaston kokeellisista talotutkielmista.



Esimerkki valokuilusovellutuksesta, joka voi toimia pienten huoneistojen myötä esimerkiksi opiskelija-asuntolana tai hotellina. Kun keskeinen atrium-yhteistila sijaitsee keskellä kerospohjaa asukkaiden arkisten reittien solmukohdassa, sillä voidaan luoda kasvualustaa asukkaiden välisille sosiaalisille kontakteille. Asunnon ulko-ovea edeltävä tasku luo puoliyksityisen reviirin asunnon eteen. Asuntokohtaiset ulkotilat ovat yhdistelmiä moduulin väliin jäävästä suojaisesta taskusta ja valoisasta terassista. Kun asunnon pääikkunan edessä oleva ulkotila on asunnon huonetilaa korkeampi, se ei varjosta sisätalaa.

Atrium-tila saattaa jäädä osin varjoisaksi. Terassipihojen ongelmana voidaan nähdä se, että alakerran vastaavaan asuntokohtaiseen ulkotilaan on suora näkyvyys.

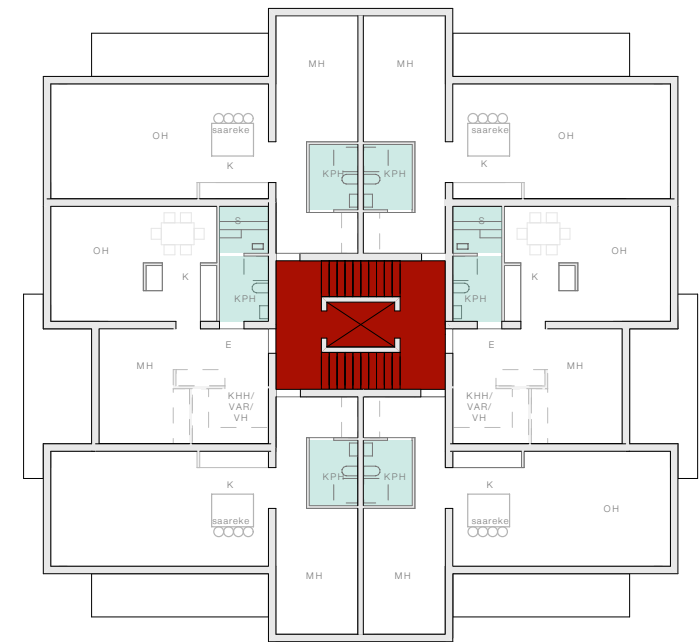


Esimerkki rakennustypistä, jossa rakennuskokonaisuus rajaa suurta yhtenäistä pihaa. Toistaalta, kun lähes kaikki kaupunkimainen rakentaminen on täydennysrakentamista jo rakennetulle paikalle, malli on esimerkki myös olemassa olevaa korttella täydentäville L-massoille. Asuinrakennuksen vastakkaiset kulmat on nostettu ilmaan niin, että myös rakennusmassan alle jää suojaista ulkotilaa. Keskeinen puolijulkinen piha voidaan jakaa pienempiin osiin. Moduulien välisessä taskussa asuntokohtainen ulkotila on intiimi ja suojaista säältä. Näin syvää moduulien välistä ulkotilaa on syytä hyödyntää kylmien varastojen sijoittamisessa asunnon välittömään yhteyteen. Asuntokohtaisia ulkotiloja voi käyttää yksityisesti tai kahden asunnon jakamana tilana.

Nostettujen kulmien ansiosta sisäpiha on avoin myös rakennuskokonaisuuden ulkopuolelle. Mittavan avoimuuden vuoksi ongelmana voi olla yksityisyyden puute. Pihan yksityisyyttä voidaan korostaa esimerkiksi rajaavin elementein tai korkeuseroin. Sijoittuminen auringon kiertoon ja olemassa olevaan kaupunkirakenteeseen nähden on tutkittava tarkkaan, jotta voidaan optimoida asuntojen valo-olosuhteet. Kokonaisuudessa sisäpiharatkaisussa pohjoiseen ja katsova kulma tai sivu voidaan ratkaista esimerkiksi vuokrattavina toimistohuoneina. Asuntokohtaiset ulkotilat saattavat jäädä taaksoiltaan varjoisaksi.



Esimerkkejä typologiakirjaston kokeellisista talotutkielmista.



Esimerkki pistemäisestä kerrostalosta. Pistemäinen rakennusmassa muodostaa lähtökohtaisesti väljää ulkotilaa. Asukkaiden yhteistilat kiertyvät spiraalina rakennuksen ympärille. Kun asukkaat voivat ottaa haltuunsa vapaasti käytettäviä, asunnon välittömässä yhteydessä sijaitsevia yhteistiloja, voi asuinympäristön sisällä syntyä myös samanhenkisiä tiiviimpiä yhteisöjä. Asuntokohtaiset ulkotilat sijoittuvat moduulien välsiin taskuihin. Rakennusmassan terassoinnilla mahdollistetaan osalle asunnoista yksityiset pihaportaat.



3. RAKENTEET

Markku Heinisuo ja Juuso Lahdenmaa, TTY

3.1. Johdanto

Modulaarisissa teräskennorunkoisissa taloissa kantavat rakenteet on koottu joko perinteisesti kantavasta rungosta, joka on jäykistetty levyillä ja siteillä, tai kuten tässä tapauksessa, kantava rakenne on kokonainen tehtaalla koottu moduuli, jossa ei ole erillistä runkoa. Itse teräskenno kantaa pystykuormat tasoilta perustuksiin. Vaakuorvat välitetään perustuksiin teräskennojen ja erillisten siteiden ja kehien yhteisvaikutuksella. Perusosat kuormien kannossa ovat vaak- ja pystytasot sekä niiden väliset liitokset.

FIXCEL®-teräskenno on valmistettu kylmämuovatuista ja sinkityistä, noin 1 mm:n vahvuisista teräslevyistä liittämällä ne toisiinsa erityisellä liitostekniikalla, jolloin peruslevyn pinta säilyy ehjänä turvaten teräsosien pitkäaikaiskestävyyden. Pysty- ja vaakarakenteet valmistetaan teräskennosta yhteen suuntaan kantaviksi, 70 - 200 mm pak-suiksi elementeiksi. Näistä valmiiksi aukotetuista ja listoitetuista seinä-, katto- ja lattiaelementeistä kootaan kokoonpanotehtaassa moduulit, jotka varustellaan ja kuljetetaan työmaalle. Yksi moduuli voi olla yksi huoneisto tai porraskäytävä tai sen osa. Kun moduuleja kootaan rinnakkain ja päällekkäin, huoneistojen väleille syntyy tuplarakenne, joka estää tehokkaasti ilmajen siirtymisen ja sivutie-siirtymät huoneistojen välillä. Palotilanteessa tuplarakenne mahdollistaa kuormituksen uudelleen jakautumisen.

FIXCEL-tekniologian sovelluksille ei ole löytynyt kirjallisuudesta ohjeistusta valmistukseen ja rakenteiden suunnitteluun. Seuraavassa kuvataan TTY:llä vuosina 2011 - 2012 tehtyjä tutkimuksia ja niistä johdettuja suunnittelusääntöjä koskien FIXCEL-teräskennorakenteita rakennuksissa. Peruslähtökohta tutkimukselle oli, että tutkimuksen jälkeen kaikkien olennaisten osien lujuusmitoitukseen on olemassa kokeilla varmennetut turvalliset suunnittelusäännöt. Lujuustarkastelun perustana ovat Eurokoodit. Myös uusia sovellutuksia teräskennorunkoihin moduulitaloihin ideoitiin ja tutkittiin. Tutkimuskohteina olivat myös uudet arkkitehtiratkaisut, kuten esimerkiksi ulokkeet, isojen aukkojen ylitykset ja terassoinnit sekä niihin liittyvät rakenteelliset ratkaisut.

Tekesin rahoittamaa Concels-tutkimusta edelsi kaksi TTY:ssa tehtyä diplomityötä sekä lattiakennojen värähtelytutkimus. Näissä tutkimuksissa on kehitetty perusteita modulaaristen teräskennorunkoisten talojen rakennesuunnitteluun. Toppila (2012) kehitti moduulien rakenteisiin mitoituskaavat, jotka sisältävät lattia- ja seinäkennojen käyttörajatilan ja murtorajatilan tarkastelut. Mitoituskaavojen perusteena on eurokoodien mukainen poikkileikkausluokan 4 analyysi. Toppilan tulokset ovat päälähte käytännön kohteiden rakenteiden suunnittelussa. Yli-Sikkilä (2012) tarkasteli uloke- ja aukkoratkaisuja teoreettisesti. Työn lopputuloksena todettiin kokeellisen tutkimuksen tarpeellisuus. Näitä kokeita on tarkasteltu seuraavassa. Rantala (2011) mittasi varustettujen lattiaelementtien ominaisvärähtelyä. Kohteiden käyttörajatilan tarkasteluissa lattiaelementeille tehdään värähtelymitoitus TRY:n normikortin mukaisesti. Kokeista saatujen tuloksien perusteella huomioidaan pintarakenteiden poikkitaivutuskyky. NEAPOn toimesta rakenteiden tutkimuksia on tehty muuallakin, mm. palokokeita VTT:llä sekä akustisia ja tiiveysmittauksia. Niitä ei kuitenkaan käsitellä tässä luvussa tarkemmin.

Concels-tutkimuksessa päädyttiin projektiryhmän ohjauksessa tutkimaan seuraavat asiat – sekä kokeellisesti että johtamaan kokeellisista tuloksista mitoitusarvot:

- poraruuviin kestävyys leikkauksessa ja ulosvedossa
- lattia- ja seinäelementin välinen liitos
- moduulin toiminta siltana
- pelkän lattiakennon värähtely
- lattiakennon kestävyys ja jäykkyys taivutuksessa
- pelkän seinäkennon normaalivoiman kestävyys
- seinäkennon pistevoiman kestävyys.

Kokeet toteutettiin ja niistä johdettiin suunnitteluarvot soveltaen seuraavia standardeja ja ohjeita: EN 1990 (2005), EN 1993-1-3 (2005) ja ECCS TC7 TWG 7.10 (2009). Seuraavaksi on kuvattu Concels-projektissa toteutetut tutkimukset koskien teräskennorunkoisten moduulitalojen rakenteita. Kaikista tutkimuksista on olemassa yksityiskohtaiset raportit, joista löytyvät määritellyt suunnitteluarvot eri tilanteisiin. Raportit ovat NEAPOn omaisuutta.

3.2. Poraruuvien kestävyys kennosaumassa

Kuvassa 3.1. on esitetty poraruuvi saumassa. Ruuvi porautuu saumassa kuuden ohutlevyn läpi. Tällaiselle liitokselle ei ole olemassa lujuusmitoitukseen sopivia arvoja standardeissa ja ohjeissa. Varmalla puolella oleva arvo saadaan, kun käytetään standardien ohjeita kahden ohutlevyn läpi poratuille ruuveille.

Kestävyys määriteltiin leikkausvoimalle sauman suunnassa, saumaa vastaan kohtisuorassa suunnassa sekä ulosvedolle. Teräslautakappaleissa oli DX51D ja levyjen nimelliset paksuudet olivat 0,7 ja 1,0 mm. Ruuvit olivat tyyppiä Senco DuraSpin 48IP19MC ja SFS-Intec SD14-T15-5,5x46 (kuva 3.2.). Käytetyt kuormitusjärjestelyt ruuvikokeissa on esitetty kuvassa 3.3.

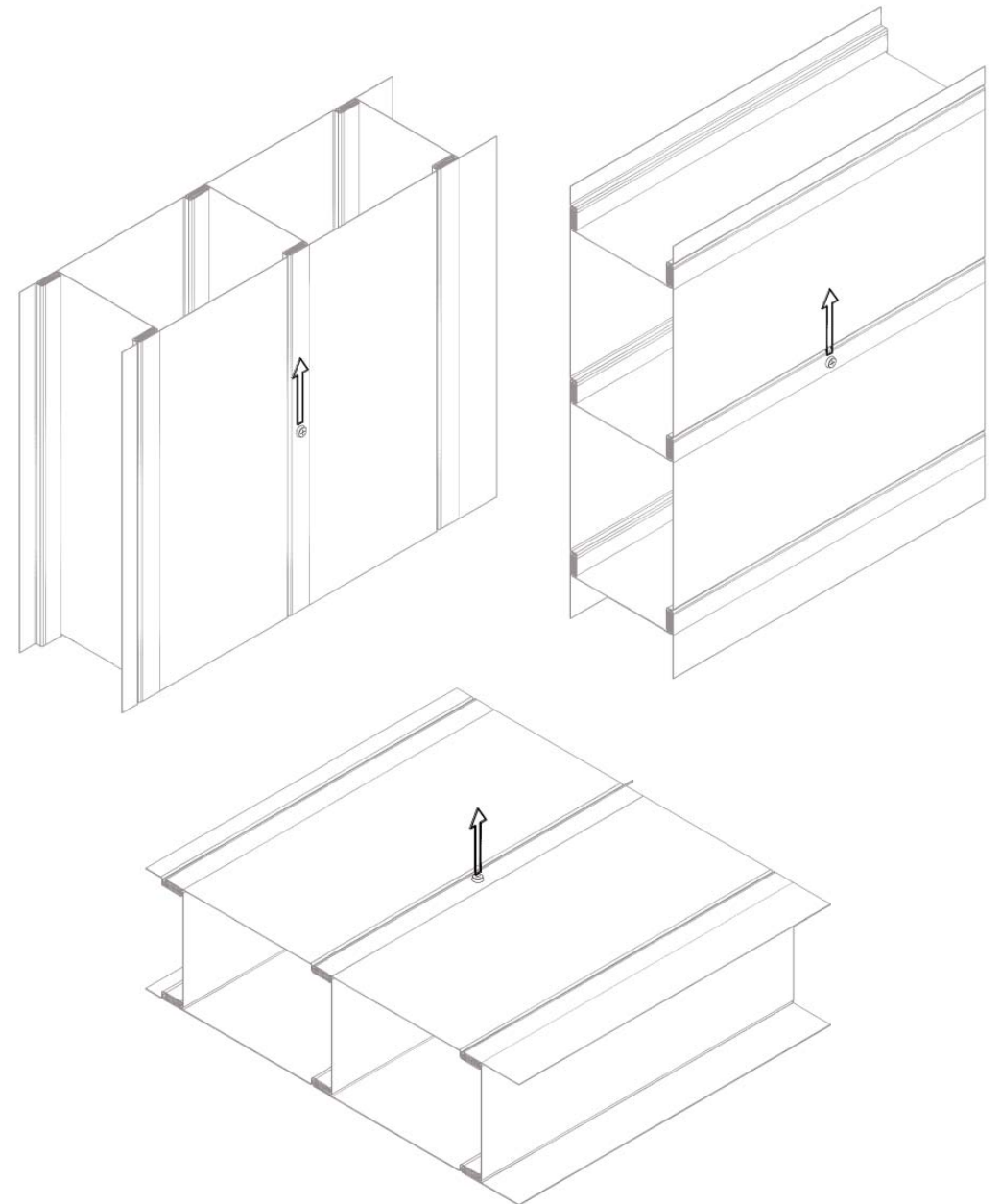


Kuva 3.1. Ruuvaus FIXCEL®-kennon ydintaitteessa.

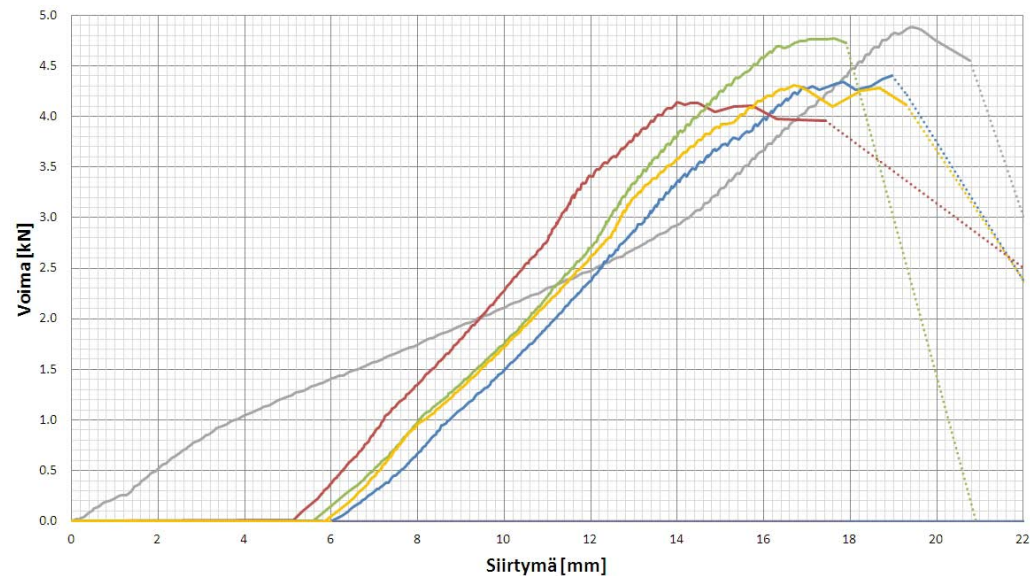


Kuva 3.2. Sencon ja SFS-Intec:n poraruuvit.

Kuva 3.3. Kuormitusjärjestelyt ruuvikokeissa



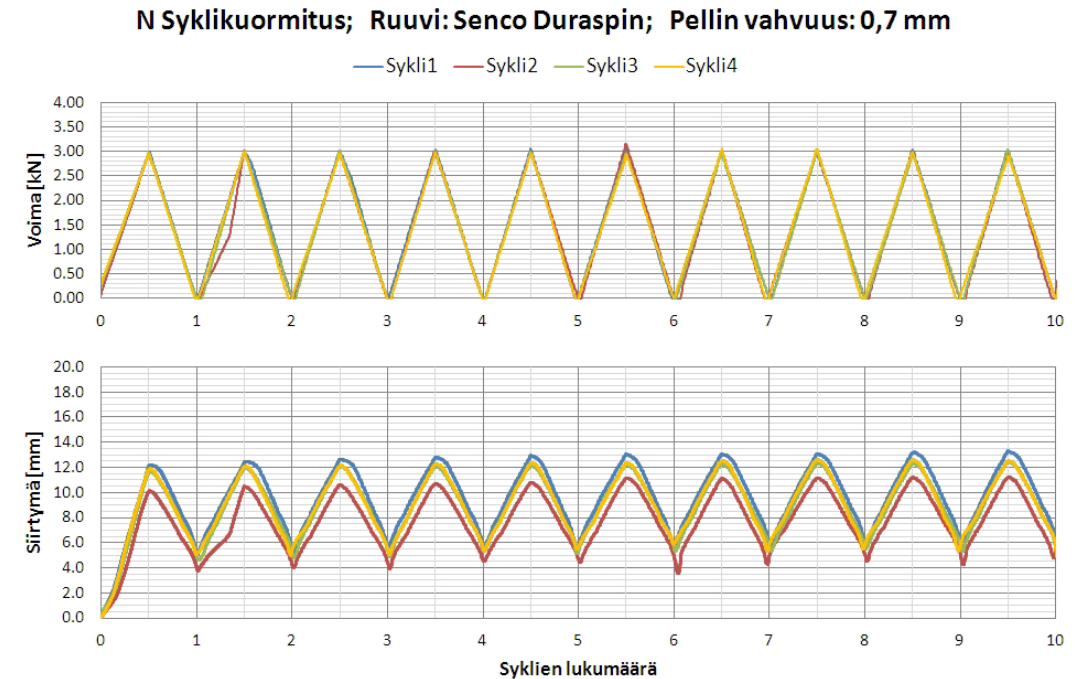
Kuva 3.4. Ulosvetokoe kennon nimellisen ainevahvuuden ollessa 0.7mm ja ruuvina Senco Duraspin. Harmaa käyrä: Ensimmäinen suoraan murtoon vedetty koe. Muut käyrät: 10 syklin jälkeen murtoon.



Kaikki erilaiset yhdistelmät testattiin viidessä erillisessä kokeessa. Leikkauskokeissa ensimmäinen koe kuormitettiin suoraan murtoon. Loput neljä koetta testattiin viidellä syklisellä kuormalla, jossa suurin kuorma oli +/-60 % ensimmäisen kokeen murtokuormasta ja lopuksi murtoon. Ulosvedoissa loput neljä koetta kuormitettiin +60 % ensimmäisen kokeen murtokuormasta kymmenellä syklillä ja lopuksi murtoon. Kaikkiaan tehtiin 60 koetta. Levymateriaalin lujuus ja paksuus mitattiin myös.

Kuvassa 3.4. on voima/siirtymä-kuvaajat sekä ensimmäiselle ulosvetokokeelle että neljälle kymmenen syklin jälkeen kuormitetulle koekappaleelle. Tässä kokeessa syklin maksimikuorma oli 2,9 kN.

Kuva 3.5. Ulosvetokoe kennon nimellisen ainevahvuuden ollessa 0.7mm ja ruuvina Senco Duraspin. Voima ja siirtymä sykleittäin.



Kuvasta 3.4. nähdään, että liitoksen murtokuorma ei oleellisesti muuttunut sykliden jälkeen, keskiarvon ollessa 4,4 kN ja hajonnan 0,27 kN. Syklin maksimikuorma oli 2,9 kN, joka on suurempi kuin lopullinen mitoituskuorma 2,41 kN tässä tapauksessa. Pysyvä siirtymä syklisessä kuormituksessa syntyi ensimmäisessä syklissä, kuten kuvassa 3.5 on esitetty.

Standardin EN 1993-1-3 (2005) mitoituskaavoja voi käyttää myös. Esimerkiksi ulosvedossa, jossa $n > 2$ levyä liitetään toisiinsa, varmalla puolella oleva sääntö löydettiin: käytetään $n-1$ levyä liitoskaavassa. Ruuvien asennuksessa on oltava huolellinen ja varmistettava, että ruuvi porautuu kaikkien levyjen läpi.

3.3. Lattia- ja seinäelementin liitos

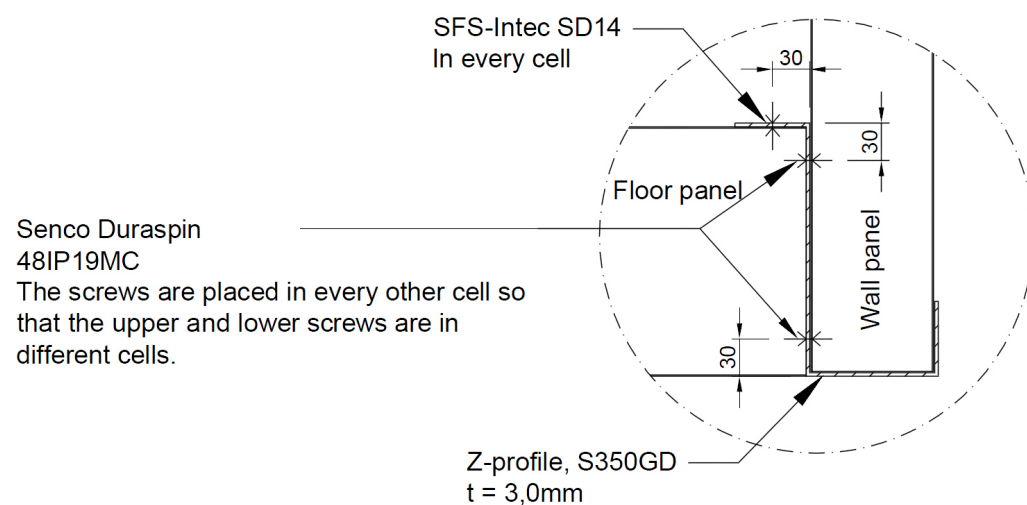
Lattia- ja seinäelementtien liitoksella on suuri vaikutus sekä lattian että seinän rakenteelliseen käyttäytymiseen. Liitoksen tärkein tehtävä on siirtää lattiaelementin päässä oleva leikkausvoima seinälle ja edelleen seinän alla olevalle tuelle. Lattia- ja seinäelementin suunnittelussa on tunnettava liitoksen kiertymäjäykkyys, koska sillä on vaikutusta sekä lattian että seinäelementin suunnitteluun. Käyttörajalassa liitoksen kiertymäjäykkyys vaikuttaa lattian taipumiin ja värähtelyyn. Murtorajatilassa liitoksen kiertymäjäykkyydellä on vaikutusta sekä lattian että seinän kestävyteen. Onnettomuustilanteessa liitoksella on vaikutusta mm. koko moduulin vääntöjäykkyyteen, jos esimerkiksi toinen tukiseinä syystä tai toisesta katoaa moduulin alta.

Perinteisesti liitos on oletettu niveleksi, jolloin momenttia ei välity liitoksessa. Tutkimuksen kohteena olivat liitoksen kiertymisjäykkyys sekä momentti- ja leikkausvoimakkestävyys. Tutkimus toteutettiin kuormittamalla täyden mittakaavan liitoksia eri momentti/leikkaus-

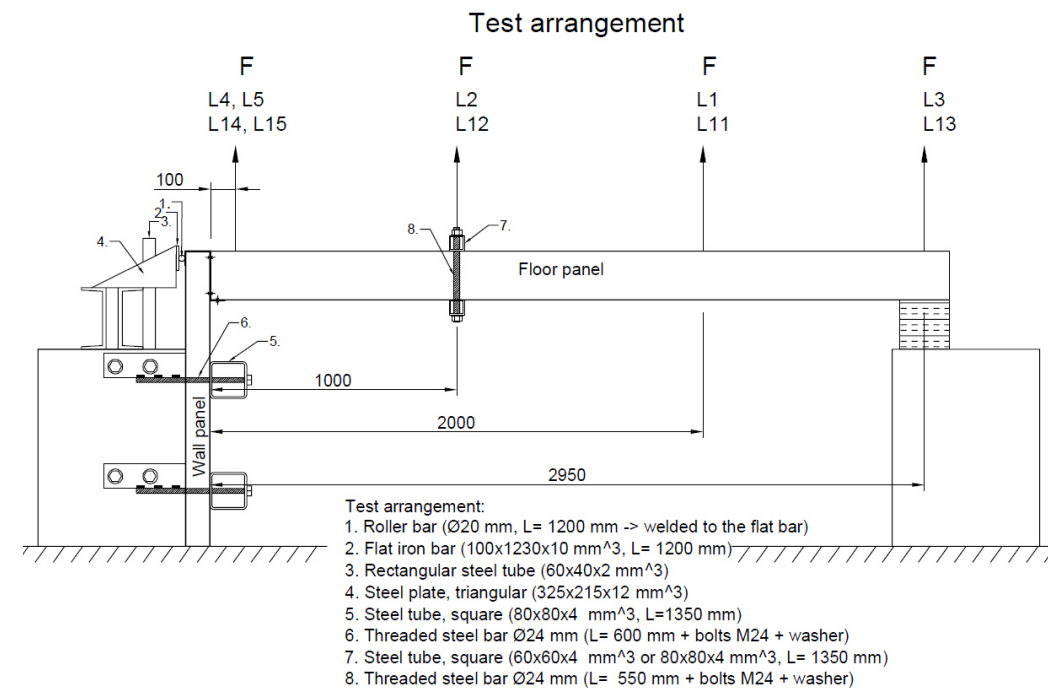
voima-yhdistelmillä. Kaikkiaan tehtiin kymmenen koetta, joissa muuteltiin momenttivartta ja seinäkennon uumalevyjen asemaa lattiakennon uumalevyihin nähden. Uumalevyjen sijaintia vaihtamalla pyrittiin järjestämään liitokselle suurin ja pienin kiertymäjäykkyys. Suurin kiertymäjäykkyys ajateltiin saavutettavan, kun lattia- ja seinäkennon uumalevyt ovat kohdakkain, ja pienin kiertymäjäykkyys vastaavasti kun uumat ovat mahdollisimman kaukana toisistaan. Seinien uuma- ja pintalevyjen nimellispaksuudet olivat 0,7 mm. Lattiapaneelien uumat olivat 0,7 mm ja pintalevyt 1,0 mm. Lattia- ja seinäelementtien välinen liitosdetalji on esitetty kuvassa 3.6.

Lopulliset kokeet toteutettiin kääntämällä liitos 180 astetta, tukemalla seinäelementit alustaan ja kuormittamalla lattiaelementtiä viivakuormalla ylöspäin kuvan 3.7. mukaan.

Kuva 3.6. Lattia- ja seinäelementin liitos.



Kuva 3.7. Kuormitusjärjestely.



Suurella momenttikuormalla liitoksen murtotapa oli ruuvien ulosveto kuvan 3.8. mukaan. Suurella leikkausvoimalla murtotapa oli lat-tiakennon ja Z-orren välisten ruuvien ulosveto.

Tuloksista määriteltiin liitoksen momentti/kiertymä-yhteys ja tulokse-na saatiin kuvan 3.9. mukainen kolmen suoran mukainen arvio lii-toksen kiertymäjäykkyydeksi.

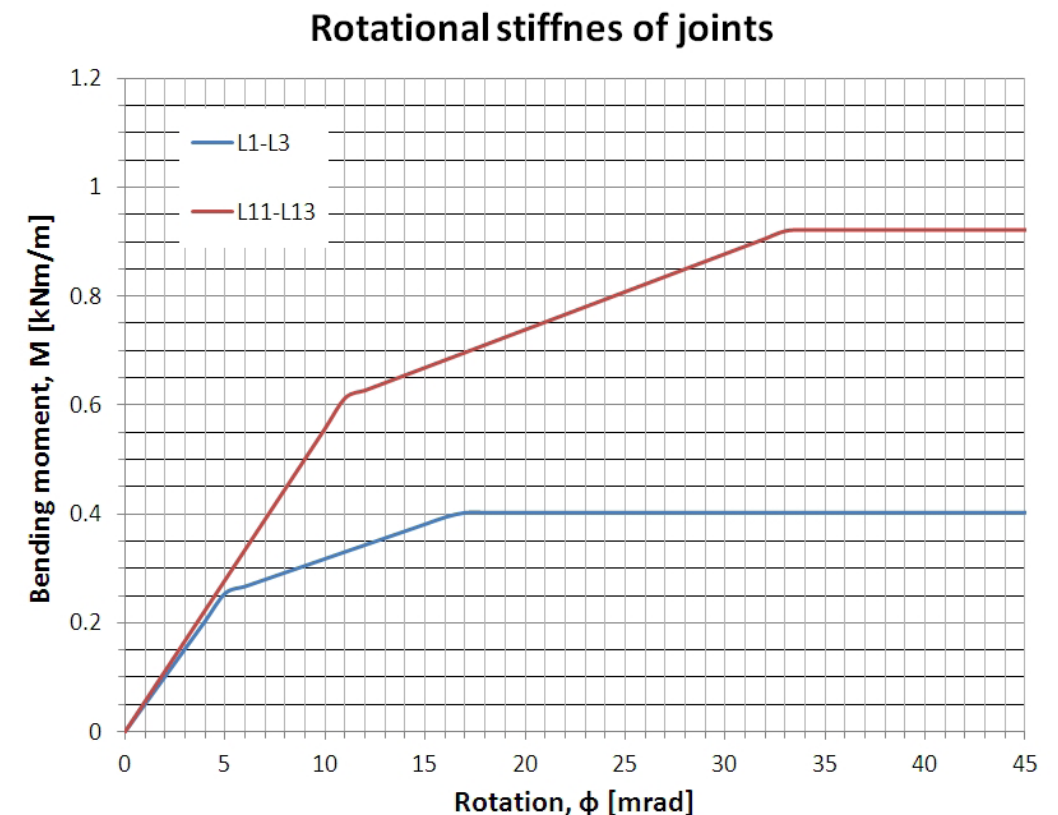
Käytännössä kuvan 3.9. mukainen kiertymäjäykkyys on hyvin pieni; liitos suositellaan mitoitettavaksi nivelenä tutkitulla kokoonpanolla. Kiertymäkykyä löytyi yli 50 mrad kaikissa kokeissa.

Murtotavat momenttikuormituksissa olivat samanlaiset, joten ne voitiin käsitellä perheenä, kun määriteltiin kestävyyskokeis-ta. Standardien ja ohjeiden mukaan koetulokset on sovitettava mi-tattuihin lujuuksiin ja paksuuksiin, kun suunnittelu-arvoja määritel-lään käytettäväksi nimellisten lujuuksien ja paksuuksien kanssa.



Kuva 3.8. Murtuminen liitoskokeessa L2_1 m.

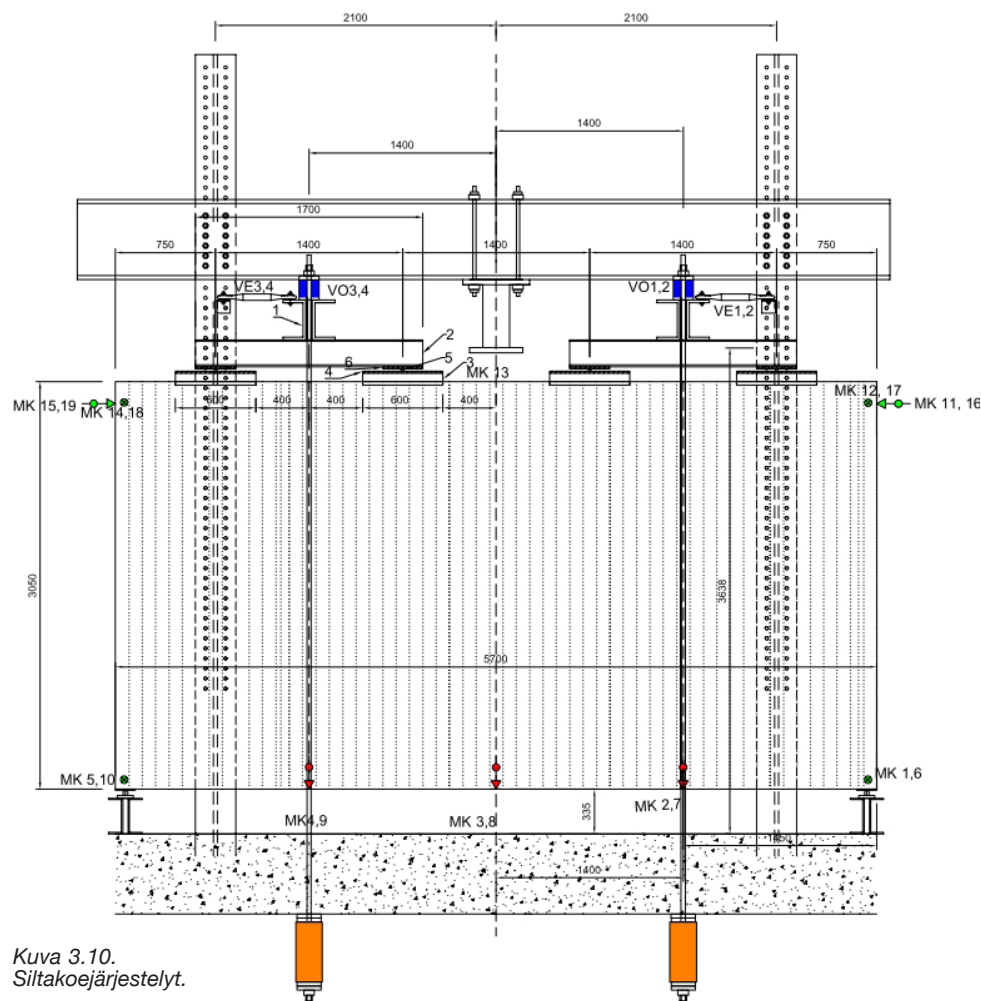
Tässä tapauksessa mitatut paksuudet olivat sangen lähellä nimel-lisiä paksuuksia, ollen kuitenkin varmalla puolella. Sen sijaan mita-tut lujuudet poikkesivat huomattavasti nimellisistä lujuuksista. Mita-tut murtolujuudet olivat luokkaa 410 MPa, kun materiaalille DX51D voidaan käyttää vain murtolujuutta 270 MPa. Tämä ero vaikuttaa si-ten, että se pienentää kohtuuttomasti määriteltyjä kestävyyskokeis-ta teräslaadulle. Esimerkiksi testissä L1_2m mitattu momenttikestä-vyys oli 2,02 kNm ja leikkauskestävyys 0,76 kN. Sovituksen jälkeen kestävyudet olivat 1,08 kNm ja vastaavasti 0,40 kN. Karakteristinen, suunnittelussa käytettävä arvo momenttikestävyydelle oli tässä ta-pauksessa 0,40 kNm. Tästä syystä jatkossa kannattaisi harkita mi-tatun lujuuden käyttöä suunnittelussa nimellisen lujuuden sijasta, mikäli se saadaan varmennetusti selville käytettävästä teräksestä. Vaihtoehtoinen tapa määrittää karakteristiset arvot on käyttää stan-dardien sallimaa tapaa ottaa huomioon vain yksi koetulos. Rapor-teissa on esitetty karakteristiset arvot, jotka on määritelty tällä me-netelmällä.



Kuva 3.9. Liitoksen yksinkertaistettu momentti/kiertymä-yhteys johdettuna liitoskokeiden tulosten perusteella.

3.4. Moduulin toiminta siltana

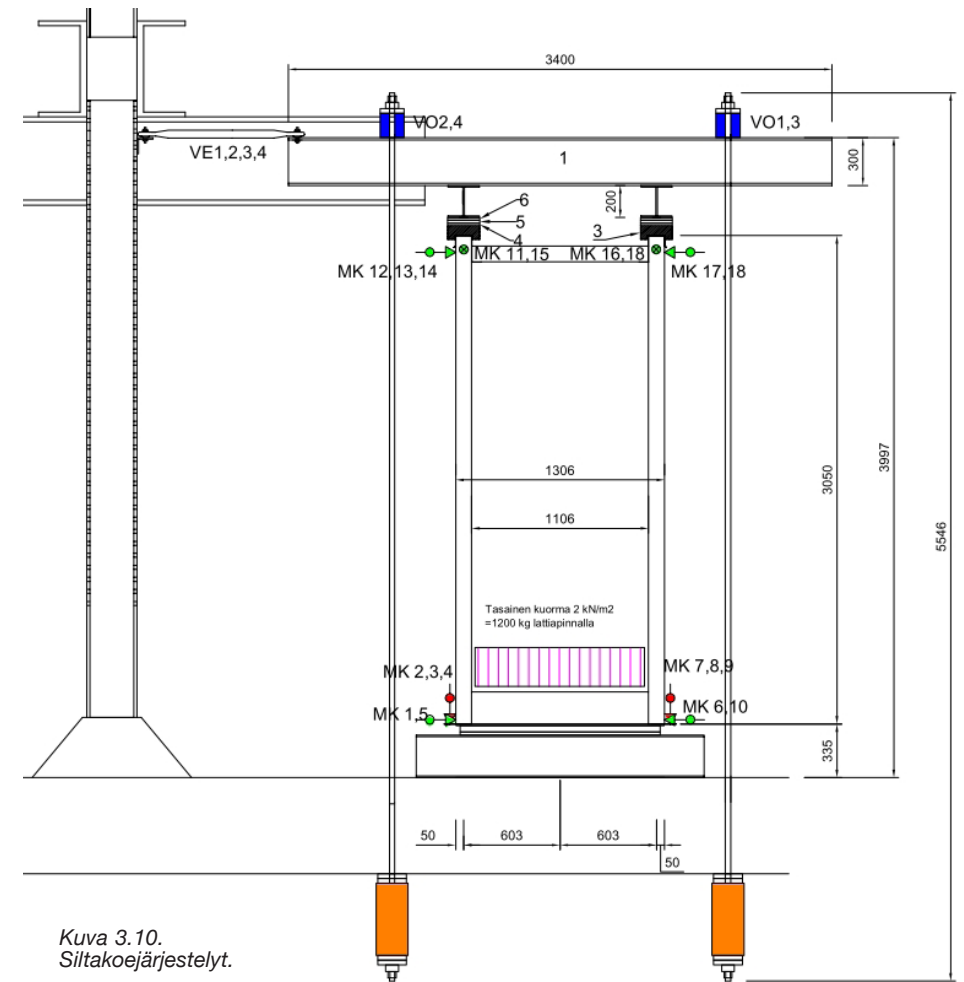
Moduulirakentamisesta pyritään löytämään mahdollisuuksia antaa arkkitehtisuunnittelulle lisää vapausasteita. Erilaiset ulokeratkaisut ja suurten aukkojen ylitykset moduuleilla tekevät mahdolliseksi mm. uudet tai ainakin toistaiseksi vain vähän käytetyt julkisivu-, sisäpiha- ja terrassiratkaisut kerrostaloihin. Näihin liittyviä rakenteellisia kestävyyskysymyksiä on tutkittu analyttisesti (Yli-Sikkilä 2012) ja kokeellisesti tässä tutkimuksessa.



Kuva 3.10.
Siltakoejärjestelyt.

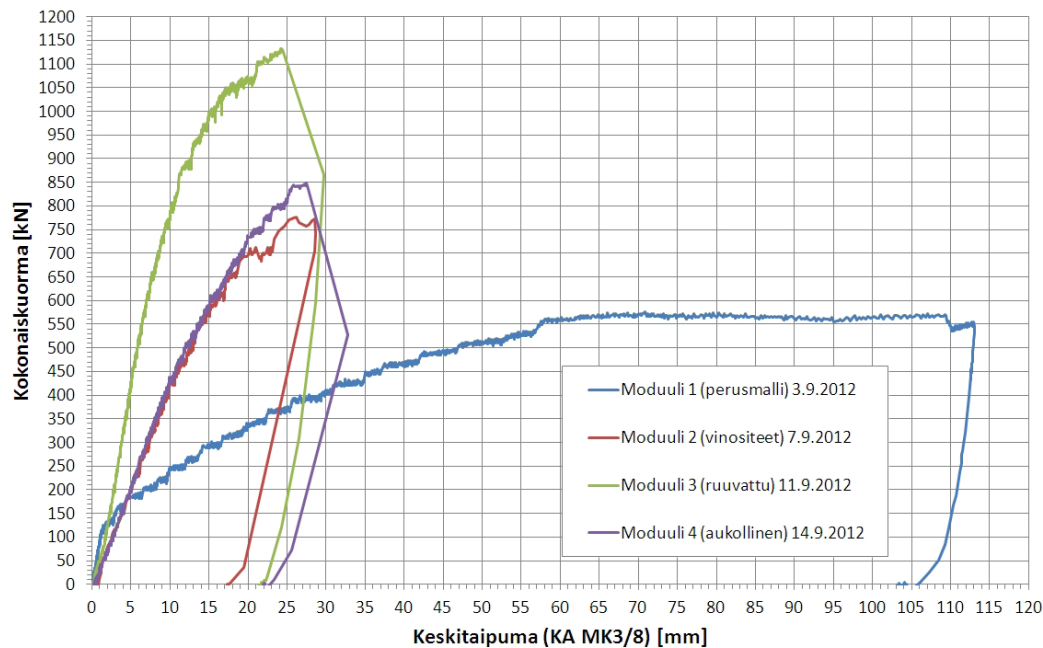
Moduulitehtaalla valmistettiin neljä kokonaista täyden mittakaavan moduulia, joiden kokonaispituus oli 5,7 m, leveys 1,3 m ja korkeus 3,05 m. Moduuleissa oli vain teräsosat. Moduuleita kuormitettiin lattiakuormalla 200 kg/m² ja tunkku kuormilla yläreunasta murtoon. Koejärjestely on esitetty kuvassa 3.10.

Ensimmäinen koe tehtiin normaalille moduulille, jossa ei ollut mitään vahvistuksia. Toinen moduuli oli vahvistettu teräslevyistä (3x120 mm²) valmistetuilla vinositeillä, ja kolmas oli vahvistettu ruuvaamalla kaikki seinäkennojen saumat ruuveilla. Neljäs moduuli oli ruuvattu kuten kolmas, ja seinissä oli lisäksi suuret aukot. Kuvassa 3.11. on koetulokset eri tapauksille.



Kuva 3.10.
Siltakoejärjestelyt.

Koekappaleiden keskitaipuma kokeen aikana

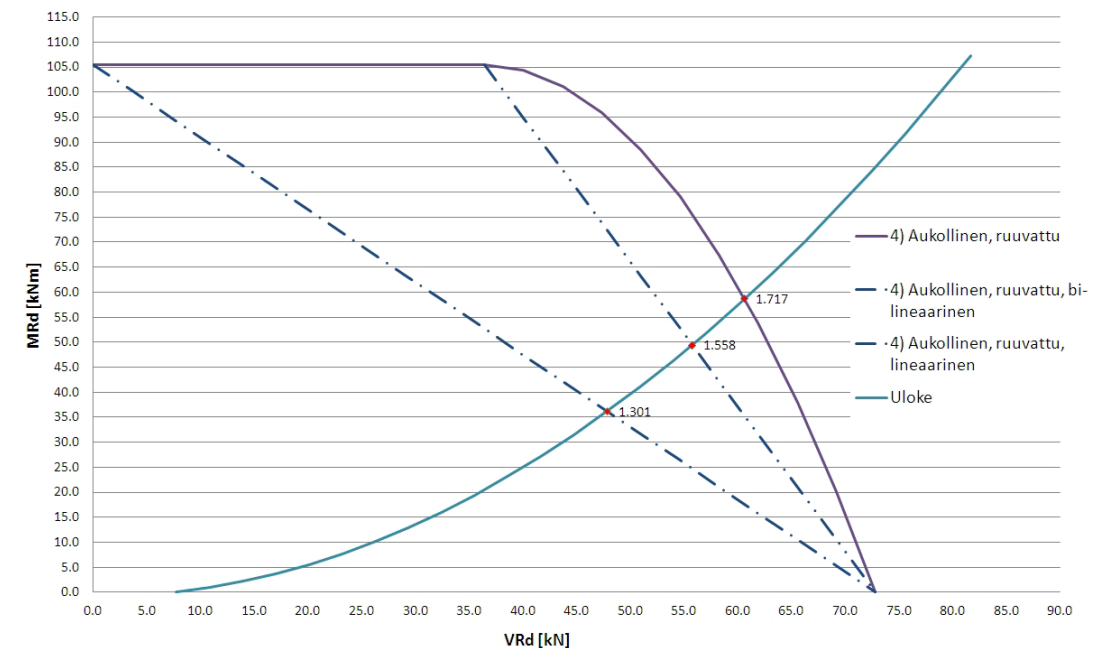


Kuva 3.11. Koetulokset neljälle moduulille

Kuvasta 3.11. nähdään, että ruuvattu reiätön koekappale kesti yli 1000 kN kuorman yläreunastaan lattiakuorman ja oman painonsa lisäksi. Itse asiassa moduulia ei saatu murtumaan tässä kokeessa, vaan murtotapa oli tuella olevan putkivahvistuksen murto alapäästä. Moduuli 1 (perusmalli) kesti yli 550 kN kuorman yläreunastaan, mutta siirtymät alkoivat kasvaa hieman yli 100 kN kuormasta alkaen. Tässä siirtymien kasvuvaiheessa koekappaleesta kuului epämiellyttävää "natinää" ja "pauketta" johtuen leikkausmuodonmuutoksista teräskennon saumoissa sekä reunaprofiilien ja elementin välisessä saumassa. Leikkausmuodonmuutos reunaprofiilien ja elementin välillä aiheutti ruuvien katkeamisen saumassa. Vinositeillä vahvistettu ja reiällinen ruuvattu moduuli kestivät suunnilleen saman verran kuormaa.

Koetulosten perusteella on määritetty standardeja soveltaen suurimmat jännevälit siltamaiselle ja ulokemoduulille käytettäväksi suunnittelussa. Määritetyt jännevälit pätevät vain koestettuihin rakennustapoihin. Perusmoduuli ei sovellu kovin pitkille ulokkeille; sen ongelmanna ovat leikkausmuodonmuutokset teräskentöjen saumoissa.

Aukollinen ruuvauksella vahvistettu



Kuva 3.12. Aukollisen, ruuvauksella vahvistetun moduulin kestävyys yhdistetylle rasitukselle kokeiden perusteella sekä esimerkki ulokkeen rasituksista kun lattian jänneväli on 6,0 m.

Kun leikkausmuodonmuutokset eliminoidaan, niin moduulin kestävyys on sängen suuri, kuten ruuvatun moduulin koe osoitti. Vinositeet ovat tehokas tapa eliminoida leikkausmuodonmuutokset. Vinositeiden mitoitus on yksinkertaista ja voi perustua nivelpäisten sauvojen teoriaan. Vinosauvojen päiden ja seinän välisen liitoksen suunnittelussa on huolehdittava, että voima pystyy siirtymään vinosauvalta seinäelementille. Lisäksi voiman on pystyttävä siirtymään tuelle, eli seinäelementtiä on vahvistettava tukialueella tarpeen mukaan, esimerkiksi kuormituskokeissa käytössä ollut putkivahvistusta soveltamalla. Aukolliset moduulit voidaan toteuttaa esimerkiksi siten, että paneelien saumat vahvistetaan ruuvaamalla, kuten koekappaleissa oli tehty.

Esimerkiksi vinositeillä vahvistetulla moduulilla voidaan ylittää suurimmillaan 4,0 m – 6,0 m pitkä aukko normaaleilla lumi- ja lattiakuormilla, riippuen lattiakennon jännevälistä (6,5 m - 4,0 m). Jos lattiapaneelin pituus on 6,5 m, niin yksi vinositeillä vahvistettu moduuli voi kantaa 4,0 m, 2,4 m tai 1,7 m pitkän aukon yli, riippuen siitä onko vahvistetun paneelin päällä yksi, kaksi tai kolme kerrosta.

Tavoitteena oli selvittää myös moduulin toiminta ulokkeena, jolloin moduulilla on rasituksena yhtä aikaa taivutus ja leikkaus. Kuvassa 3.12. on esitetty esimerkkinä aukollisen, ruuvauksella vahvistetun moduulin koetulosten perusteella määritellyt kestävydet moduulin seinän yhdistetylle rasitukselle. Yhteisvaikutusehdoista on esitetty kolme erilaista mallia, joista nyt tehtyjen kokeiden perusteella on syytä käyttää lineaarista (pistekatkoviiva) mallia, joka on aina varmallalla puolella oleva oletus. Kuvassa sininen käyrä esittää ulokemoduulin seinän rasituksia, kun lattian jänneväli on 6,0 m. Käyrien leikkauspisteisiin merkityt arvot ovat saavutettavien ulokkeiden mittoja eri yhteisvaikutusmalleilla.

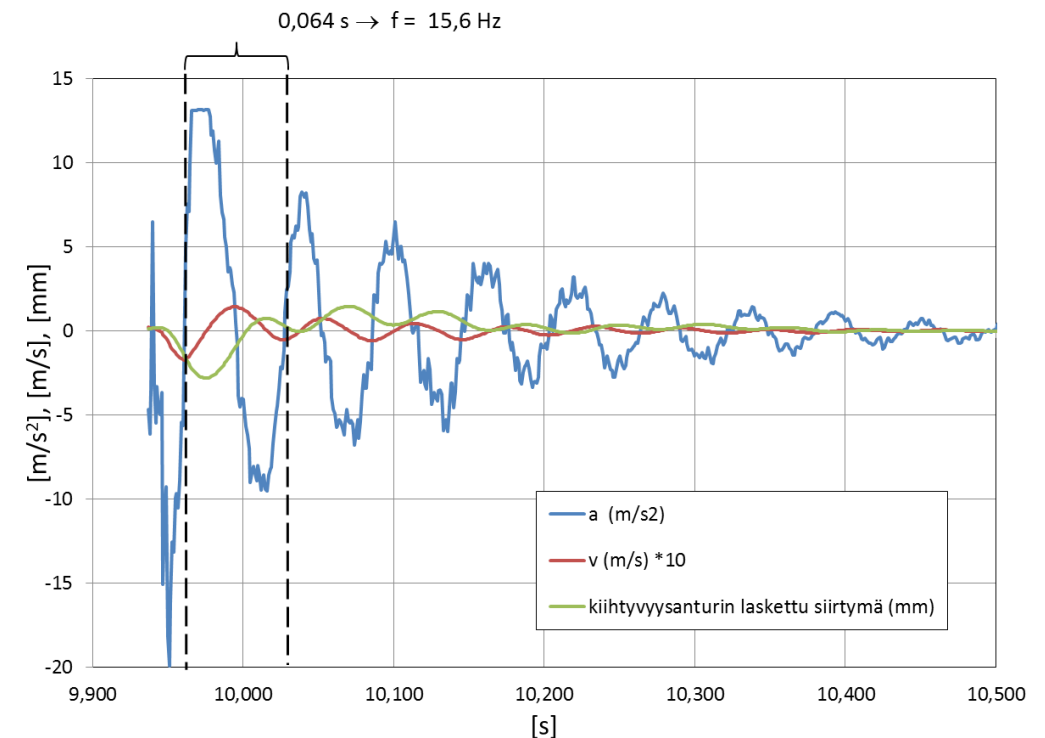
3.5. Lattiakennon värähtely

Aiemmin oli mitattu varusteltujen lattiaelementtien värähtelyjä (Rantala 2011). Nyt laboratorioon toimitettiin kuusi 6,0 m pitkää ja 1,0 m leveää ja 200 mm korkeaa lattiakennoa ilman varusteluja eli pintarakenteita. Tukiväli kokeissa oli 5,8 m. Kennojen päissä oli puutulpat, jotka estivät kennon uuman lommahtamisen tuella. Samoillem kennoille määriteltiin taivutuskestävyydet värähtelykokeiden jälkeen.

Kaikissa testatuissa lattiakennoissa uuman niemellispaksuus oli 1,1 mm. Pintalevyjen nimellispaksuudet olivat kolmessa kennossa 0,7 mm. Näissä kennoissa kuusi onteloa oli nimellislevydelään 150 mm (merkintä: 200/k150-0,7x1,1x0,7). Toisessa kolmen sarjassa pintalevyjen nimellispaksuus oli 1,1 mm ja näissä kennoissa oli yhdeksän onteloa nimellislevydelään 100 mm (merkintä: 200/k100-1,1x1,1x1,1).

Kokeissa mitattiin värähtelyt ns. heel-drop testillä, missä 80 kg painava henkilö pudottaa oman painonsa jalan kärjiltä kantapäälle. Toisessa testissä mitattiin kennojen taipumat 1,0 kN:n pistekuormasta kuormitusalan ollessa 25 x 25 mm². Värähtelytestissä lasketaan taipumat Duhamelin integraalilla ja laskettua taipumaa verrataan mitattuun taipumaan. Värähtelymittauksesta voidaan lukea rakenteen ominaistajuus mittaamalla peräkkäisten amplitudien välinen aika. Kuvassa 3.13. on yhden testin mittaustulos ja siitä päätelty ominaistajuus. Kuvassa on esitetty myös värähtelyn kiihtyvyydestä laskettu nopeus ja siirtymä.

Tuloksista on määritelty normikortin TRY (2005) mukaan lattiakennon luokitus talonrakennuksessa. Kaikkien testattujen kennojen ominaistajuus oli yli 10 Hz, jolloin ne luokitellaan korkeataajuuksiksi lattiaiksi. Värähtelyluokka määräytyy 1,0 kN voimasta aiheutuvan taipuman mukaan. Kun pintalevy on 0,7 mm, niin luokka on E, ja kun pintalevy on 1,1 mm, niin luokka on D. Suositus värähtelyluokituksista asuin- ja toimistorakennuksissa on esitetty taulukossa 3.1.



Kuva 3.13. Lattiakennon värähtely. Kenno: 200/k100-1,1x1,1x1,1.

Aiemmissa kokeissa (Rantala 2011) mitattiin pistekuorman mukainen taipuma noin 4 m pitkälle lattiakennolle sekä ilman pintarakenteita että pintarakenteiden kanssa. Pintarakenteet pienensivät 1 kN:n kuorman aiheuttaman taipuman noin puoleen siitä, mitä se oli ilman pintarakenteita, joten pintarakenteilla on merkittävä värähtelyominaisuuksia parantava vaikutus näissä rakenteissa.

Taulukossa 3.2. on esitetty kokeellisesti mitatut arvot ja vastaavat laskennalliset arvot. Taulukon arvoista voidaan nähdä, että laskennalliset taajuuudet ja taipumat ovat varmalla puolella.

Taulukko 3.1. Suositus asuin- ja toimistorakennusten värähtelyluokituksista (TRY normikortti 17/2005)

Värähtelyluokka	Värähtelyluokan soveltamisalue
A	Normaaliluokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Erikoisluokka, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
B	Alempi luokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Ylempi luokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
C	Normaaliluokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
D	Alempi luokka asuinrakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa. Esim. omakotitalojen ullakot tai vapaa-ajan asunnot.
E	Luokka, jolle ei aseteta rajoituksia.

Taulukko 3.2. Lattian ominaistaajuuudet ja taipumat

Koe	Lattiakennon tyyppi	Ominaistaajuus mitattu f (Hz)	Taipuma mitattu δ_0 [mm]	Ominaistaajuus laskennallinen f (Hz)	Taipuma lasken. δ_0 [mm]
L1	200/k150 0,7×1,1×0,7	14,9	1,49	13,08	5,45
L2	200/k150 0,7×1,1×0,7	15,1	1,82		
L3	200/k150 0,7×1,1×0,7	15,3	1,48		
L4	200/k100 1,1×1,1×1,1	15,6	0,92	14,65	2,34
L5	200/k100 1,1×1,1×1,1	16,1	0,86		
L6	200/k100 1,1×1,1×1,1	15,9	1,01		

3.6. Lattiakennon taivutuskestävyys

Samat kennot kuin edellä kohdassa 3.5 testattiin taivutuskokeissa murtoon asti. Kuvassa 3.14. on esitetty lattiakokeiden järjestelyt.

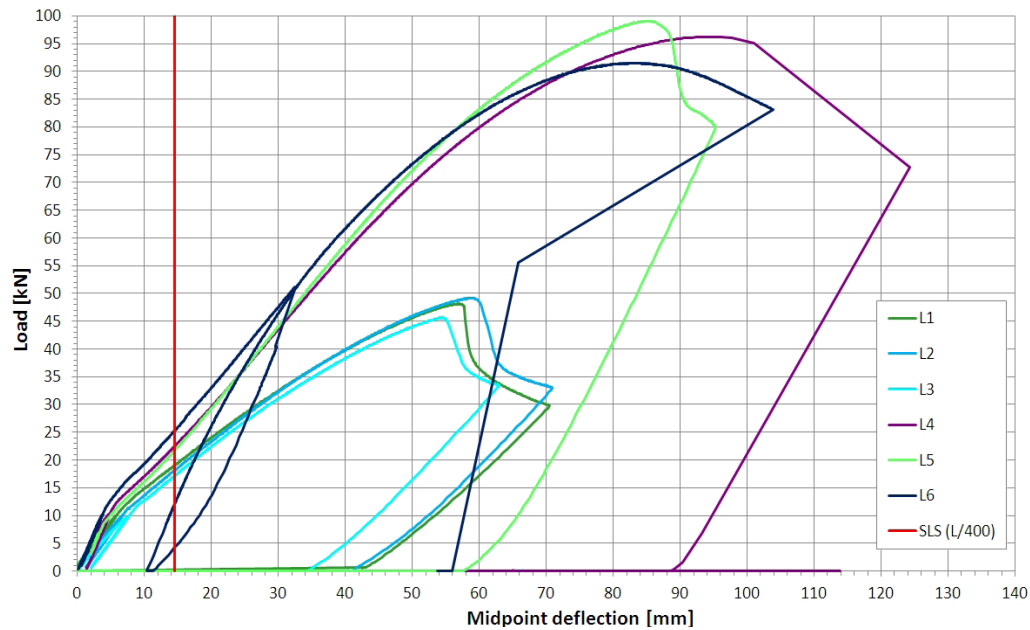
Kuormitus tuotettiin neljällä linjalla 200 mm leveiden vanerilevyjen kautta. Murtotapa kokeissa oli teräskennon pintalevyjen lommahdus. Kuvassa 3.15. on esitetty koetulokset.

Kuva 3.14. Lattiakokeet.



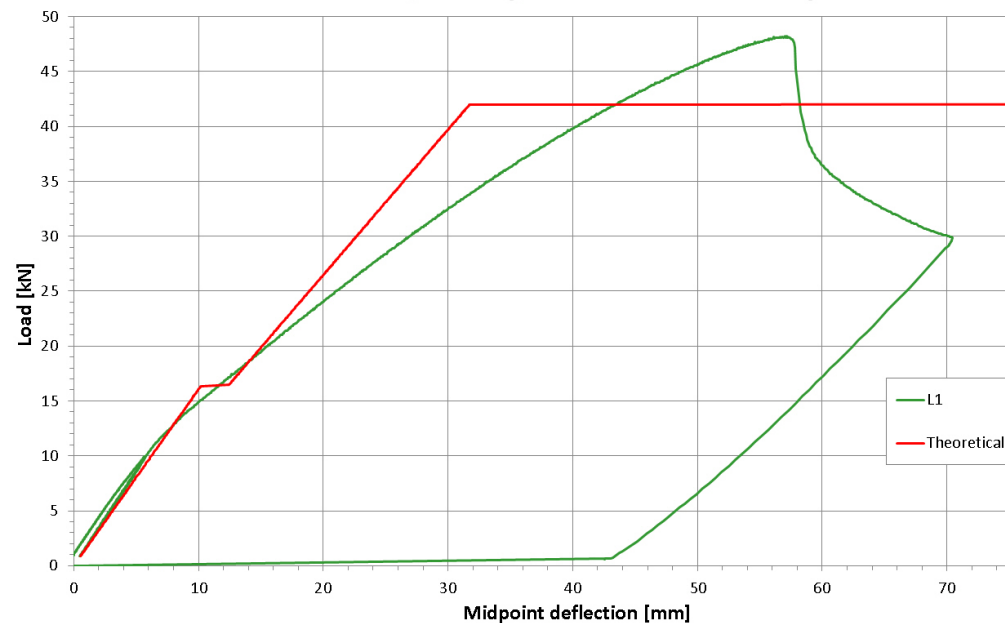
Kuvasta nähdään uumien suuri vaikutus teräskennojen taivutuskestävyyteen ja taivutusjäykkyyteen. Kokeissa L1 - L3 oli seitsemän 1,1 mm uumaa ja kokeissa L4 - L6 kymmenen 1,1 mm uumaa. Pintalevyt olivat koekappaleissa L1 - L3 0,7 mm ja koekappaleissa L4 - L6 1,1 mm. Uumien ja pintalevyjen liitoskohdissa on materiaalikeskittymät johtuen kennojen valmistustekniikasta, mikä kasvattaa uumien vaikutusta. Tuloksia arvioitaessa 50 kN:n kokonaiskuorma tarkoittaa pintakuormaa $50/6 = 8,3$ kN/m². Taipumaraja L/400 on tässä tapauksessa 14,5 mm (punainen viiva kuvassa 3.15.). Taipumaraja on lattiarakenteissa yleensä aina kriittinen rajatila. Kuvan 3.15. kaikissa tapauksissa taipumaraja L/400 tarkoittaa yli 15 kN:n kokonaiskuormaa eli $15/6 = 2,5$ kN/m² lattiakuormaa 5,8 m jännevälille; varmuutta murtoon jää paljon. Näin voidaan päätellä siitä huolimatta, että käyristä eliminoidaan kuvassa näkyvät alkujäykkyydet.

Fixcel® floor element, bending test: load-deflection diagrams



Kuva 3.15. Koetulokset lattiakennon taivutuskokeista.

Fixcel® floor element, bending test: load-deflection diagrams



Kuva 3.16. Lattiakennon jäykkyys kokeessa ja teoreettisesti, lommahdus huomioon ottaen.

Kuvan 3.15. kuvaajista nähdään myös, että teräskennolla on alkujäykkyys, joka pienenee lopulliseen, hyvin tarkasti lineaariseen arvoon kuormituksen kasvaessa. Osittain muutos johtuu leikkausmuodonmuutoksesta pintalevyn ja uuman välisessä saumassa, osittain levyjen lommahtelusta. Teoreettisesti laskettuna elementtien jäykkyys pienenee lommahduksen tapahtuttua noin 10-20 %: L1 - L3 (200-k150-0,7x1,1x0,7) laskennallisten jäykkyyksien suhde $E_{eff}/E_{gros} = 0,82$ ja L4 - L6 (200-k100-1,1x1,1x1,1) $E_{eff}/E_{gros} = 0,86$. Mitoituksessa on syytä käyttää lopullista jäykkyyttä, joka on palautuva, kuten kuvan 3.15. käyrän L6 syklistä selvästi nähdään. Kuvassa 3.16. on esitetty yhden kokeen mukainen mitattu jäykkyys ja teoreettinen, lommahduksen huomioon ottava jäykkyys. Kuvasta voidaan nähdä, että teräskennon alkujäykkyys vastaa hyvin teoreettista arvoa (punainen murtoviiva). Teoreettisessa kuvaajassa on otettu huomioon ainoastaan levyjen lommahdus. Kokeellisesta tuloksesta voidaan havaita, että taivutusjäykkyyden muutos on suurempi kuin pelkän lommahduksen aiheuttama jäykkyyden pieneneminen. Tämä johtuu leikkausmuodonmuutoksesta uuma- ja pintalevyjen välillä, koska liitos on valmistustekniikasta johtuen mekaaninen, eikä näin ollen estä täydellisesti liukumaa levyjen välillä. Toppila (2012) on esittänyt kuinka leikkausmuodonmuutos teräskentöjen saumassa otetaan huomioon taipumia laskettaessa.

Lattiakokeiden tuloksista voidaan päätellä lattiakennon pään minimikestävyys leikkausvoimakkestävyydelle metriä kohti, koska kennon leveys kokeessa oli metri. Tämä arvo on puolet kokonaiskuormasta. Kuormituskohdista saadaan lattiakennon pistevuomakestävyyden minimiarvo 200 mm leveälle kuormitukselle, jakamalla kokonaiskuorma neljällä, koska kuormituskohtia oli neljä. Koetuloksista voidaan arvioida suunnittelukuorma jakamalla koetulos arvolla 2,7, kuten edellä on selvitetty. Tarkemmat koetuloksiin perustuvat suunnitteluarvot on kirjattu raportteihin. Tämä kerroin on epätavallisen suuri johtuen suuresta erosta mitatun ja nimellisen lujuuden välillä, kuten edellä on esitetty.

3.7. Seinäkennon normaalivoiman kestävyys

Pystykuormia kantavat seinät ovat oleelliset osat teräskennorunkoisessa moduulitalossa. Teräskennoelementtejä valmistavassa tehtaassa valmistettiin kolme seinäkennoa puristuskokeita varten. Elementtien leveydet olivat 1,0 m ja korkeudet 3,0 m. Yksi koekappale oli valmistettu 0,7 mm nimellispaksuuden levyistä. Kennon kokonaispaksuus oli 70 mm ja uumia oli 150 mm välein, S6: 70/k150-0,7x0,7x0,7. Toinen kenno oli samanlainen kuin ensimmäinen, mutta sen kokonaispaksuus oli 100 mm, S2: 100/k150-0,7x0,7x0,7. Kolmas kenno oli valmistettu 1,0 mm levyistä; kokonaispaksuus oli 100 mm kuten myös uumien välimatkat, S1: 100/k100-1,0x1,0x1,0. Kaikki nämä kuormitettiin yläreunasta keskeisellä kuormalla murtoon. Yläreunassa oli nivelellinen kiinnitys ja alareunassa oli jäykkä tuenta. Kuvassa 3.17. on esitetty koejärjestely.

Kaikissa kokeissa murtotapa oli paikallinen murto yläreunassa. Murtokuorma vaihteli 144 kN – 180 kN välillä eli 144 kN/m – 180 kN/m, koska seinäkennon leveys kokeissa oli 1,0 m. Kokeiden mukaan murtotapa tällä koejärjestelyllä ei ollut nurjahdus, kuten laskennassa oletetaan. Brutto poikkileikkaukselle (Agross) laskettu jännitys jäi koetulosten perusteella noin 80 MPa. Seinäkennon levyt lommahtavat kuitenkin jo pienemmällä kuormalla. Tämä oli selvästi nähtävissä pintalevyissä koekuormituksen aikana, kuten voidaan nähdä myös kuvasta 3.18.

Kun otetaan huomioon levyissä tapahtuva lommahdus, saadaan teholliselle poikkileikkaukselle (Aeff) laskettua jännitys, joka oli koekuormitusten perusteella noin 200 MPa. Nimellisellä lujuudella ($f_y = 140$ MPa) laskettuna nurjahduskestävyyden arvot ovat kennolla S6: $N_R = 127,6$ kN ja kennolla S2: 134,9 kN. Kennolla S1 murtuminen tapahtui kuormittavan tunkin kohdalta pistemäisesti, jolloin oli selvästi nähtävissä, että kuormittava voima ei ollut jakautunut koko poikkileikkaukselle. Tämä johtui kuormitusjärjestelyssä käytetystä jakavasta palkista, joka ei ollut tarpeeksi jäykkä ja pääsi taipumaan eikä siten jakanut kuormaa koko poikkileikkaukselle.

Suunnittelussa on kiinnitettävä erityisesti huomiota kuormien siirtymiseen vaakarakenteelta seinärakenteelle. Ruuvauksen merkitys kuormaa siirtävänä osana korostuu, koska seinäkennon päässä levyn vapaa reuna ei pysty vastaanottamaan kosketuspaineella koko kuormaa lommahtamatta. Ruuvaus ja reunaprofiili toimivat levyn vapaan reunan lommahdusta rajoittavina tukina.

Lisäkokeita tarvitaan, jotta pystytään varmentamaan seinän laskennallinen nurjahduskestävyys. Korkeampien talojen vaatiessa suurempaa pystykuorman kapasiteettia seiniltä tulee tutkia seinissä käytettyjen pintakerrosten kipsilevyt kuormaa kantavina ja seinän nurjahdusta rajoittavina rakenneosina. Tällaisia kokeita tullaan jatkossa tekemään MODCONS-hankkeen osana.

Kuva 3.17. Puristuskokeet.



Kuva 3.18. Pintalevyjen lommahtelu seinäkennon aksiaalisessa kuormituksessa

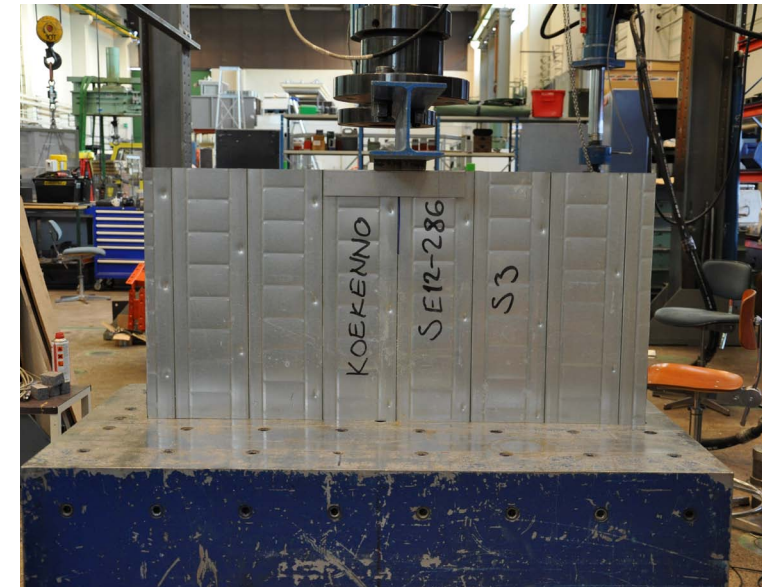


3.8. Seinäkennon pistevoiman kestävyys

Seinäkennojen pistevoimakestävyyttä tutkittiin vastaavilla koekappaleilla (leveys 1,0 m) kuin puristuskestävyyttä edellä, mutta vain 0,7 mm levystä valmistetuilla kennoilla, koodit 70/k150-0,7x0,7x0,7 ja 100/k150-0,7x0,7x0,7. Koekappaleiden korkeudet olivat 500 mm; molempia kennotyyppejä oli kolme samanlaista. Koekappaleet kuormitettiin 100 mm leveällä teräspalkilla, joka oli poikittain seinän päällä. Kuormitus kohdistui seinän päällä olevaan 270 mm pitkään, 3 mm seinämän omaavan U-teräsorren keskikohtaan. Teräsorsi lepäsi kiinnittämättä seinän päällä kuormittavan poikittaisen I-palkin keskikohdalla. Ensimmäiset kokeet (3+3 kpl) tehtiin siten, että kuormituksen keskikohta oli uuman kohdalla keskellä seinää (kuva 3.19). Toiset kokeet tehtiin samoja koekappaleita (3+3 kpl) kuormittamalla siten, että kuormituksen keskikohta oli keskellä uumaväliä. Näistä kuudesta kokeesta viidessä oli lyhyempi U-teräsorsi (noin 100 mm) kuormituksen alla ja yhdessä kokeessa ei ollut ortta ollenkaan vaan kuormitus kohdistui suoraan seinäkennon pintalevyihin. Yhteensä tehtiin 12 koetta. Kun kuorma oli uumien väleissä, koekappale oli kuormitettu jo aiemmin murtoon siten, että kuormituskohdat olivat uumien kohdilla. Näin ollen koekappaleet olivat jo ”käräsineet” aiemmissa kokeissa, mikä luonnollisesti heikensi niitä.

Kaikissa kokeissa murtotapa oli paikallinen murto kuormituskohdista. Uumien kohdilta kuormitetuissa kappaleissa murtokuormat vaihtelivat välillä 33,3–43,6 kN. Kun kuorma vaikutti uumien keskikohdilla, niin tuloksista on nähtävissä, että aluksi kestävyydelle löytyi paikallinen maksimi-arvo. Tämän jälkeen koekappale otti vielä vastaan lisäkuormitusta, mutta siirtymät olivat jo sangen suuret. Paikallinen maksimi-arvo saavutettiin noin 2 mm:n siirtymällä. Kun kuormitusta jatkettiin, kuormitus saattoi kasvaa noin kaksinkertaiseksi, mutta siirtymät olivat jo 20 mm luokkaa. Kuvassa 3.20. on koekappaleita kokeiden jälkeen. Kuvassa on kolmen 100/k150-0,7x0,7x0,7 murtokäisten seinien yläreunat kokeiden jälkeen.

Kokeet osoittivat, että kuormituksen jakaminen pistekuorman kohdalla on erittäin tärkeää toteuttaa myös käytännössä. Mikäli suhteellisen kapea kuormituskohhta (kokeissa 100 mm leveä I-palkki) on uuman kohdalla, niin seinän pistevoimakestävyys on huomattavasti suurempi, kuin jos kuormituskohhta on uumien välissä. Saatua kestävyysarvoja voidaan pitää käytännön alarajoina, koska seinien päällä on aina käytännössä jatkuva kiinnitetty teräsorsi, joka tukee kennon pintalevyjä.



Kuva 3.19. Koejärjestely pistevoiman kestävyden määrittämiseksi.



Kuva 3.20. Koekappaleet murron jälkeen.

3.9. Yhteenveto

Kun uusia tuotteita kehitetään markkinoille, yleensä aina on edessä tilanne, että olemassa olevat normit ja ohjeet eivät kata kyseisten tuotteiden turvallisuuden kannalta oleellisia sääntöjä lujuusopillista suunnittelua varten. Tässä yhteydessä näitä sääntöjä on kehitetty teräskennorunkoisille moduulitaloille, jotka toteutetaan FIXCEL-tekniologialla. Pelkkä mitoitusääntöjen kehittäminen ei riitä, vaan säännöt on varmistettava kokeellisesti. Euroopassa käytetään Eurokoodeja ja ECCS:n ohjeita tähän tarkoitukseen, kuten on tehty tässäkin tutkimuksessa.

Tutkimuksen tavoitteena oli, että kaikki oleellisten kantavien rakenteiden mitoitusäännöt näissä teräskennorunkoisissa moduulitaloissa perustuvat tulevaisuudessa kokeellisesti varmistettuihin sääntöihin. Tämä tavoite saavutettiin lähtemällä yksittäisten ruuvien kestävydestä päätyen kokonaisten moduulien kestävyteen ja mitoitusääntöihin. Tutkimuksessa ideoitiin uusia arkkitehtonisia sovellutuksia moduulitaloihin, kuten aukkojen ylitys ja ulokeratkaisut. Lisäksi tutkimuksessa määriteltiin näiden lujuusopilliset reunaehdot. Tuloksena saatiin aikaan selkeät mitoitusäännöt erilaisiin tilanteisiin ja varmistettiin olemassa olevia sääntöjä kokeellisesti.

Voidaan väittää, että tutkimuksen jälkeen kaikki FIXCEL-teräskennorakenteilla toteutettujen moduulitalojen oleelliset osat perustuvat tutkittuihin ja kokeellisesti varmennettuihin mitoitusääntöihin koskien lujuutta. Yksityiskohtaiset mitoitusäännöt ovat NEAPO Oy:n omaisuutta ja niitä on jo käytetty käytännön kohteiden suunnittelussa. Kaikkiaan tässä tutkimuksessa tehtiin seuraavat määrät kokeita (kaikissa kokeissa mitattiin myös ohutlevyjen todelliset lujuudet ja todelliset paksuudet ilman sinkkikerrosta):

- poraruuvien kestävydet leikkauksessa ja ulosvedossa 60 koetta
- lattia- ja seinäelementin liitos 10 koetta
- moduulin toiminta siltana 4 koetta
- lattiakennot: 6 koetta värähtelyyn ja 6 koetta pistevaimon siirtymään
- lattiakennon kestävyys ja jäykkyys taivutuksessa 6 koetta
- seinäkennon normaalivoiman kestävyys 6 koetta
- seinäkennon pistevaimon kestävyys 12 koetta.

Yleisesti voidaan sanoa, että kehitetyt mitoitusäännöt ovat erittäin varmalla puolella johtuen siitä, että todellinen ohutlevyteräksen lu-

juus on sangen paljon suurempi kuin laskennassa käytettävä ohutlevyteräksen DX51D nimellinen lujuus. Mitatut laskentapaksuudet olivat lähellä nimellisiä paksuuksia. TTY:llä mitatuissa lujuuksissa ei havaittu merkittäviä poikkeamia valmistajien materiaalitodistuksissa ilmoittamiin arvoihin nähden. Kun tätä teräslaatua käytetään, niin lujuuden kannalta olisi edullista harkita perusmateriaalin lujuuden määrittelyä projektikohtaisesti. Ruuvikokeissa osoittautui, että ruuvien kiinnitykseen tehtaalla on kiinnitettävä huomiota, koska kennon pintalevyjen ja uumalevyn sauma on sangen kapea. Lattia- ja seinäelementtien liitosta on kehitettävä, mikäli liitokseen tarvitaan kiertymäjäykkyyttä tulevaisuudessa. Moduulin toiminta siltana onnistuu hyvin, kun teräskennojen levysaumojen leikkausmuodonmuutos esitetään. Tässä testattiin ruuvausta ja vinositeiden käyttöä, jotka molemmat osoittautuivat käyttökelpoisiksi. Lattiaelementtien mitoituksessa käyttörajatilat ovat kriittiset. Kestävyteen nähden varmuus tulee suureksi. Tämä takaa turvalliset perusrakenteet ja odottamattomiin tilanteisiin nähden rakenteiden vaurionsietokyky on näin ollen hyvä. Seinien normaalivoiman kestävyden määrittäminen ei onnistunut toteutetulla koejärjestelyllä.

Rakennetiimi haluaa kiittää Tekesiä, NEAPO Oy:tä ja kaikkia Concels-projektiin osallistuneita mielenkiintoisesta projektista, jota on toteutettu rakentavan yhteistyön merkeissä. TTY:n rakennetiimi koostui seuraavista henkilöistä: Juuso Lahdenmaa, Nina Lindberg, Jukka Rantala, Tomi Strander, Jukka Haavisto ja Raimo Järvinen professori Markku Heinisuon johdolla. DI Juuso Lahdenmaa toimi päättäjänä rakenteiden osalta. Tutkimustulokset ovat vankka perusta hänen jatkotutkintoonsa.

Uusia haasteita on tulossa, kun tutkittuja tuotteita pyritään käyttämään uusissa käyttökohteissa kuten esimerkiksi korkeampien rakennusten toteutuksessa, samoin kuin viemällä tuotteita maanjäristysalueille. Näissä kohteissa tullaan tarvitsemaan tulevaisuudessa tietämystä mm. teräskennoelementtien vahvistamisesta levytyksellä, erilaisten liitosten kestävydestä (mukaan lukien pitkäaikaiskestävyys) sekä palotilanteiden mitoituksista. Tätä varten EU on myöntänyt FP7-SME rahoituksen MODCONS-hankkeeseen, jossa sama rakennetiimi tulee jatkamaan vuosien 2013–2014 aikana uusien tuotteiden tutkimusta perustuen jälleen suunnittelusääntöjen varmistamiseen kokeellisesti. Näin menetellen Concels-projektissa hankittu hiljainen tieto saadaan tehokkaaseen käyttöön uusissa haasteissa.

4. TALOTEKNIikka

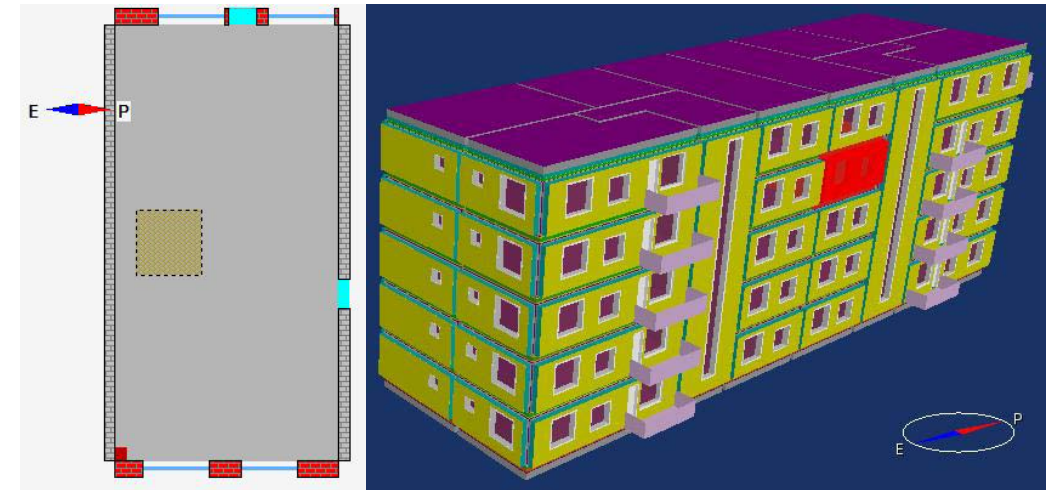
Timo Kalema ja Jyri Joutsu, TTY / Teknisen suunnittelun laitos

4.1. Energiategokkuus ja laitemitoitus

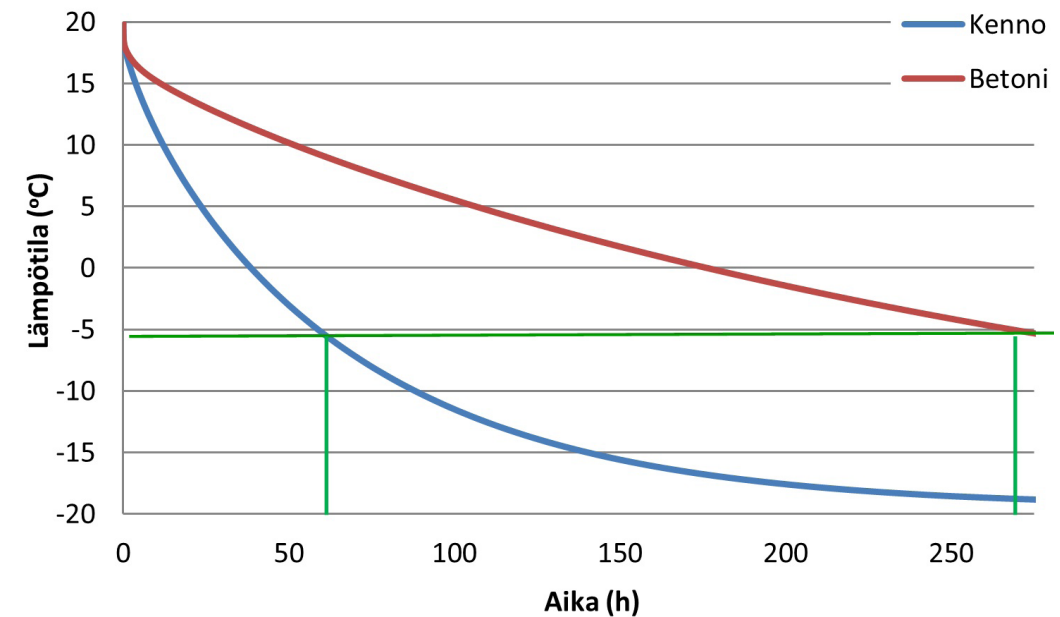
Modulaarinen teräskennorakenteinen talo eroaa tavanomaisesta betonirakenteisesta talosta lämpökapasiteetin ja aikavakion osalta. Nykyiset energiatehokkuusvaatimukset täyttävän betonirakenteisen talon lämpökapasiteetti on suuruusluokallisesti noin 260 Wh/Km² ja aikavakio noin 270 h. Kennorakenteisen talon vastaavat arvot ovat noin 60 Wh/Km² ja aikavakio noin 60 h. Lämpökapasiteetti riippuu eristeiden sisäpuolisesta massasta ja aika-vakio myös ominaislämpövähiöstä. Lämpökapasiteetti ja aikavakio eivät vaikuta käytännössä lämmitystehon tarpeeseen ja lämmityslaitteiden mitoittukseen, koska mitoituksen määräävät pakkashuiput ovat monen vuorokauden pituisia. Sen sijaan kesällä sisälämpötilojen vaihtelu ja mahdollisen jäähtytystehon tarve vaihtelevat pääosin vuorokausijaksolla, jolloin lämpökapasiteetilla on iso vaikutus. Teräskennorakenteisessa talossa on huolehdittava tehokkailla jäähtytys-, tuuletus- ja varjostusratkaisuilla siitä, että kesäajan sisälämpötilat ovat viihtyisät. Rakentamismääräyskokoelman osa D3 asettaa asuinrakennuksille vaatimuksen, että sisälämpötila saa kesällä ylittää arvon 27 °C korkeintaan 150 astetuntia (Kh).

Kennorakenteisen talon energiatehokkuutta, laitemitoitusta ja sisäilmastoa on tutkittu IDA-ICE -simulointimallilla tehdyillä laskelmilla. Laskelmat on tehty huoneistoittain (kuva 4.1) (Joutsu, Kalema, 2012). Vertailukohteena teräskennorakenteiselle talolle on vastaava kerrostalo betonirakenteisena. Simuloinneista käy ilmi, että teräskennorakenteisen ja vastaavan betonirakennuksen lämmitystehontarpeessa ja lämmitysenergian kulutuksessa ei ole merkittävää eroa. Myös kennorakenteisen rakennuksen eri huoneistojen lämmitystehontarpeet lattiapinta-alaa kohti ovat samaa suuruusluokkaa kuin betonirakennuksessa.

Kun lämmitys katkaistaan, teräskennorakenteinen rakennus jäähtyy huomattavasti nopeammin kuin vastaava betonirakenteinen. Tämä johtuu kennorakenteen pienestä lämpökapasiteetista. Teräskennorakenteisen rakennuksen alhainen lämmönvarastointikyky ilmenee kuvasta 4.2. Aikavakio saadaan kuvasta kohdasta, jossa sisälämpötila on laskenut 63 % lopullisesta muutoksestaan. Pieni lämpökapasiteetti ja aikavakio ilmenee suurena jäähtytystehon tarpeena ja korkeina kesäajan sisälämpötiloina.



Kuva 4.1. Esimerkki läpitalon menevän huoneiston B34 mallintamisesta



Kuva 4.2. Rakennuksen jäähtyminen talviaikana (-20 °C), kun lämmitys kytketään pois ja aikavakion määrittäminen.

Teräskennorakenteen alhaisesta lämmönvarastointikyvystä johtuen tällaisen rakennuksen jäähdytystehontarve on keskimäärin noin 15 prosenttia suurempi kuin vastaavalla betonirakenteisella rakennuksella. Kennorakenteisen rakennuksen huoneistomodulien välisissä jäähdytystehontarpeissa on selkeitä eroja. Erot korostuvat erityisesti rakennuksen etelä- ja pohjoispäädyn huoneistojen välillä, sillä eteläpäädyn huoneistojen jäähdytystehontarve on noin 60 prosenttia suurempi kuin pohjoispäädyn asunnoissa. Myös vastaavalla betonirakenteisella rakennuksella esiintyy edellä mainitun kaltaisia eroja eri huoneistojen välillä, mutta ero ei ole yhtä merkittävä. Perinteisen betonirakenteisen rakennuksen jäähdytysenergiankulutus on noin 15 prosenttia pienempi kuin vastaavalla kennorakenteisella rakennuksella.

Taulukko 4.1. Myllypuroon rakennettavan modulaarisen teräskennorakenteisen asuinkerrostalon E-luku. Kellarikerrosta ja sen yhteydessä olevaa pysäköintihallia ei ole otettu huomioon.

PRIMÄÄRIENERGIA (E-LUKU)	kWh/m ²
TILOJEN LÄMMITYS	20,7
LÄMMIN KÄYTTÖVESI	27,4
KIINTEISTÖSÄHKÖ	15,4
ASUKKAAN SÄHKÖ	51,3
yhteensä	114,8
JÄÄHDYTYS	8,3
yhteensä	123,1

Taulukko 4.2. Lämmitys- ja jäähdytystehojen vaihtelualue eri huoneistoissa lattiapinta-alaa kohti.

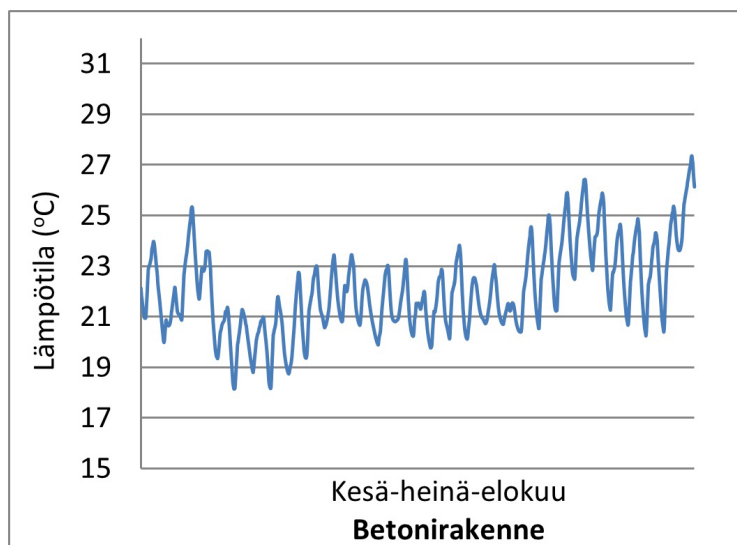
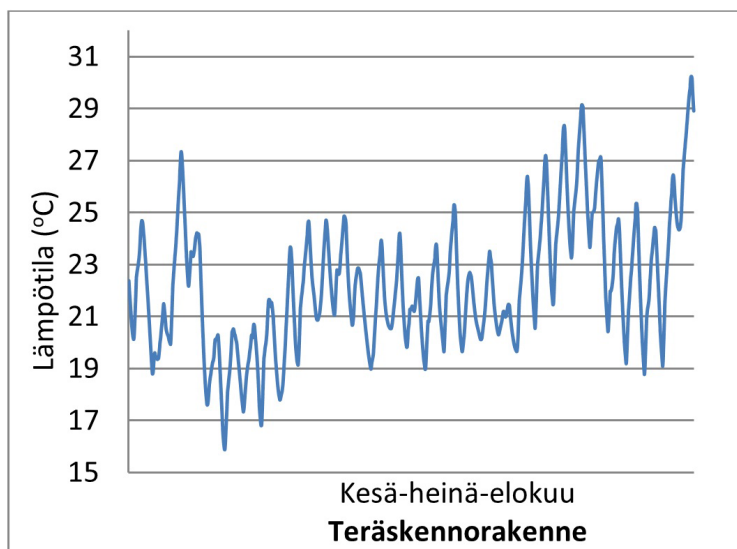
SUURE	MINIMI W/m ²	KESKIVARVO W/m ²	MAKSIMI W/m ²
LÄMMITYS	13,5	19,6	28,7
JÄÄHDYTYS	28,9	40,8	49,8

Taulukossa 4.1. on esitetty Helsingin Myllypuroon rakennetun teräskennorakenteisen modulaarisen kerrostalon energiatehokkuusluku (E-luku) sekä tekijät, joista E-luku muodostuu (Suomen rakentamismääräyskokoelma D3, 2012). Jäähdytysenergian kulutus, jos sitä käytetään, on E-luvussa noin 7 %. E-luvun kulutuslukemat on saatu painottamalla todellisia kulutuksia energiamuotojen kertoimilla (sähköllä 1,7 ja kaukolämmöllä 0,7). Rakentamismääräysten mukaan asuinkerrostalon E-luvun tulee olla alle 130 kWh/m². Kaavaillun uuden E-lukuun perustuvan energiatehokkuusluokituksen mukaan Myllypuron talon energialuokka olisi C (rajat 91 – 130 kWh/m²) (Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatodistuksesta 2012). E-luvussa asukkaiden sähkönkulutus on selvästi suurin yksittäinen tekijä ja myös lämpimän veden kulutus on suurempi kuin tilojen lämmitys. Teräskennorakenteilla saadaan siis hyvä energiatehokkuus. Ainoa varsinainen ero betonirakenteeseen taloon nähden on kennorakenteiden keveydestä johtuva tarve kesäajan sisälämpötilojen hallintaan. Taulukossa 4.2. on esitetty kennorakenteisen talon eri huoneistojen lämmitys- ja jäähdytystehojen minimi-, maksimi- ja keskiarvot lattiapinta-alaa kohti. Tehtyjen laskelmien mukaan kennorakenteissa ei ole juurikaan kylmäsiltoja.

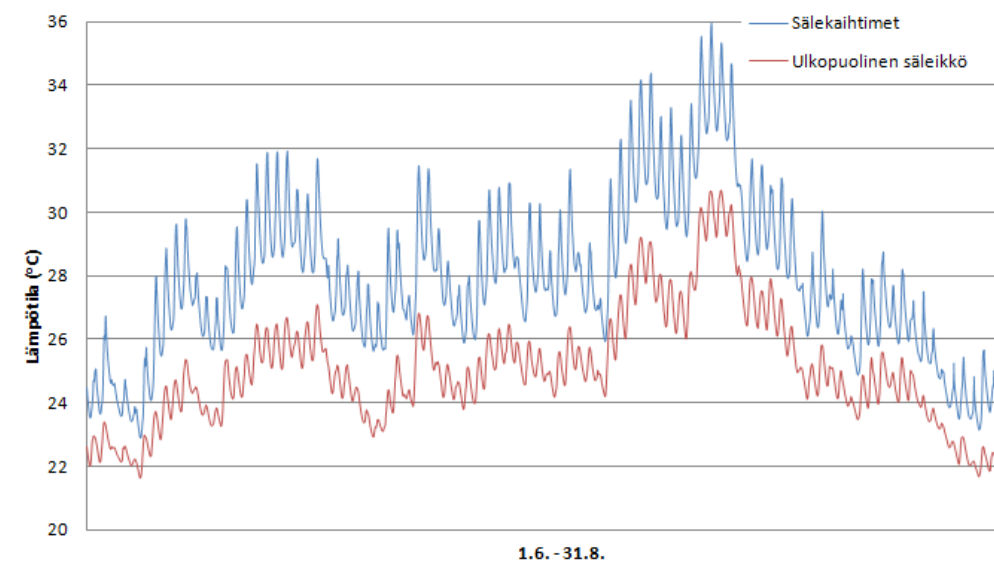
4.2. Teräskennorakenteisen moduulitalojen sisälämpötilojen hallinta

Teräskennorakenteisissa rakennuksissa, joissa ei ole jäähdytyslaitteistoja, asuntojen sisälämpötilat kohoavat kesäaikana korkeiksi. Myös rakentamismääräysten velvoittama vaatimus, jonka mukaan asuinhuoneistojen sisälämpötila saa ylittää 27 °C korkeintaan 150 astetuntia [Kh], ylittyy helposti. Huoneistojen sisälämpötilan kohoaminen on erityisen merkittävää, jos saman huoneiston ikkunat ovat suunnattu sekä etelään että länteen. Sisälämpötilojen hallinnan kannalta rakennusten suunnittelussa tulee siis kiinnittää erityistä huomiota rakennuksen lounaiskulman asuntoihin.

Helpoin ratkaisu sisälämpötilojen hallintaan on jäähdytyslaitteiston käyttö, mutta tämä lisää rakentamiskustannuksia sekä rakennuksen energiankulutusta. Erilaisilla varjostusratkaisuilla saadaan laskettua huoneistojen sisälämpötiloja ja mahdollisten jäähdytyslaitteiden energiankulutusta, mutta ne aiheuttavat samalla haasteita arkkitehtoniselle suunnittelulle. Perinteiset sälekaihtimet laskevat hieman kesäajan sisälämpötiloja, mutta varsinaista ratkaisua ne eivät kuitenkaan tarjoa. Merkittävä vaikutus sisälämpötiloihin ja jäähdytysenergian kulutukseen saavutetaan, jos käytetään ikkunoiden ulkopuolista varjostusta, esimerkiksi ulkopuolisia sälekaihtimia tai säleikköjä. Tällöin auringon säteilyenergian pääsy huoneistoihin saadaan estetyksi lähes kokonaan, jolloin myös sisälämpötilojen kohoaminen vähenee merkittävästi.



Kuva 4.3. Läpitalon menevän huoneiston B34 sisäilman lämpötilat kesän hellejaksolla teräskenko- ja betonirakenteisessa huoneistossa, kun tuuletusikkunat ovat auki ja sälekaihtimet käytössä.



Kuva 4.4. Ikkunoiden ulkopuolisen säleikön ja pelkkien sälekaihtimien vaikutus teräskennorakenteisen rakennuksen sisälämpötilaan huoneistossa, jonka sisälämpötilat kohoavat kesäaikana kaikkein korkeimmiksi.

Kuvassa 4.3. on vertailtu hellejaksolla teräskenko- ja betonirakenteisen asuinkerrostalon sisälämpötiloja läpitalon menevissä huoneistoissa (huoneisto B34 Myllypuron talossa). Kuvassa 4.4. on vertailtu sitä, miten ulkopuolinen varjostus ja pelkät sälekaihtimet vaikuttavat sisälämpötilaan pienessä asunnossa, jossa lämpötila nousee korkeimmaksi.

Myös markiisien käytöllä saadaan lasketuksi tarvittavaa jäähdytystehoa ja jäähdytysenergian kulutusta noin puoleen alkuperäisestä, mutta markiisien käyttö etenkin kerrostaloissa voi olla ongelmallista. Koneellisen ilmanvaihdon tehostaminen ei aiheuta merkittävää laskea kesäaikana kohonneisiin sisälämpötiloihin, mutta tuuletusikkunoiden jatkuva aukiolo laskee lämpötiloja huomattavasti.

Teräskennorakenteisten moduulitalojen sisälämpötilojen hallintaan liittyvä ongelma johtuu siis pääasiassa kennorakenteen alhaisesta lämmönvarastointikyvystä. Ongelmaan voi löytyä ratkaisu – tai ainakin lievitys – uusista lasi- ja eristemateriaaleista ja faasimuutosmateriaaleista, jotka hidastavat tehokkaasti lämpötilan muutoksia (Joutsu 2012). Uusilla lasiratkaisuilla voidaan aktiivisesti säätää lasin auringonsäteilyn läpäisyä ja teräskennorakenteisiin yhdistettävillä faasimuutosmateriaaleilla pienentää sisälämpötilojen vaihtelua ja mahdollista jäähdytystehon tarvetta. Uusien eristeratkaisujen merkitys on siinä, että niillä voidaan ohentaa rakenteiden paksuuksia.

5. TOTEUTUS

5.1. MODULAARISEN RAKENTAMISEN MAHDOLLISUUDET VUOKRA-ASUNTOMARKKINOILLA

Jukka Rannisto, TTY

Tässä tutkimuksessa selvitettiin modulaarisen rakentamisen mahdollisuuksia vuokrakerrostalomarkkinoilla eri tahojen näkökulmista. Tutkimuksen aineisto on kerätty haastatteluilla ja kyselyllä. Ydintutkimuksen otos koostuu yhteensä 22 rakennusalan toimijasta. Tutkimuksen henkilöt edustavat rakennushankkeen eri osapuolia. Tilaajia tutkimuksessa oli 9, urakoitsijoita 5, arkkitehtejä 3, suunnittelijoita 3 ja rakennuttajakonsultteja 2. Vastaajat tunsivat modulaarista rakentamista entuudestaan kohtalaisesti. Lähes kaikki olivat olleet mukana modulaarisessa rakennushankkeessa, tai sellaisessa hankkeessa, jossa modulaarista vaihtoehtoa oli harkittu.

5.1.1. Toteutustavan valinta

Tutkimuksessa selvitettiin, mitkä tekijät vaikuttavat toteutustavan valintaan, eli valintaan modulaarisen ja perinteisen rakentamisen välillä, ja millä tahoilla on vaikutusta tähän valintaan. Tutkimuksesta selvisi, että toteutustavan valintaan voivat vaikuttaa suoraan tai epäsuorasti hyvin monenlaiset tahot. Tilaajat ovat tärkeimpiä valintaan vaikuttavia tekijöitä, mutta myös muilla tahoilla oli vastaajien mielestä selkeä vaikutus. Vaihtoehdot ja niiden saamat painoarvot on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Vastaajien näkemys eri tahojen vaikutuksesta toteutustavan valintaan. 0-10

	TILAAJA	ARKKITEHTI	RAKENNUTTAJAKONSULTTI	URAKOITSIJAT	ASEMAKAAVATYÖRYHMÄ	SUUNNITTELIJA (LVIS)
PAINOARVO (0-10)	9,4	6,5	6,4	6,0	5,4	4,8

Modulaaristen toimijoiden pitää siis ottaa huomioon kaikkien tahojen mielipiteet. Tämä on erityisen tärkeää markkinoille pyrittäessä. Esille nousi, että yksittäisen tahon vastustus tai tietämätön toiminta voi eliminoida jo aikaisessa vaiheessa modulaarisen toteutustavan mahdollisuudet. Toisaalta yksittäiset henkilöt voivat joissakin tapauksissa tehdä paljonkin uuden rakennustavan kokeilun eteen. Tutkimuksessa selvitettiin myös vastaajien omaa kiinnostusta kokeilla modulaarista rakentamistapaa. Vastaukset olivat painottuneet selkeästi positiivisen kiinnostuksen puolelle, mutta päinvastaisiakin mielipiteitä oli.

Arkkitehdit ja muut suunnittelijat saattavat pyrkiä vaikuttamaan toteutustavan valintaan sillä perusteella, miten uskovat sen vaikuttavan heidän työmääräänsä tai tehtävänsä vaikeuteen. Suunnittelutyö voidaan vielä nähdä hankalana, koska hyväksi todettuja ja standardoituja käytäntöjä ei ole vielä olemassa. Tämän vuoksi vakioitujen sekä valmiiksi suunniteltujen ja mallinnettujen ratkaisujen kehittäminen on tärkeää. Tehdastuotannossa ratkaisujen vakiointi on myös tehokkuuden kannalta erittäin tärkeää. Arkkitehteillä nähtiin olevan merkittävä vaikutus uusien asioiden kokeilussa. Arkkitehdit ovat läheisessä tekemisessä tilaajan kanssa ja he tulevat projekteihin mukaan yleensä aikaisessa vaiheessa. Heidän suunnitelmaluonnosten ja mielipiteidensä vaikutus voi olla ratkaisevaa toteutustavan valinnan kannalta.

Kaavatyöryhmän vaikutusta pidettiin joissakin tapauksissa erittäin merkittävänä. Kaavamääräykset, jotka eivät suosi modulaarista rakentamista, ja määräysten tiukka tulkinta rakennuslupavaiheessa voivat rajoittaa modulaaristen toimijoiden mahdollisuuksia kilpailussa paikalla rakentamisen kanssa. Modulaarisen rakentamisen kannalta huonoja kaavamääräyksiä ovat ainakin sellaiset, joissa vaaditaan työmaalla rakentamista. Esimerkiksi paikalla muurattu julkisivu, väestönsuoja ja maanalainen parkkihalli lisäävät työmaalla tehtävän työn osuutta ja siten syövät moduulirakentamisen hyötyjä. Rakenteellisista syistä johtuen modulaarisen rakennuksen väliseinät ja -pohjat muodostuvat hieman paksummiksi betonielementtirakentamiseen verrattuna. Jos rakennuksen bruttoaloista pidetään lupavaiheessa tiukasti kiinni, vähenevät vuokrattavat neliöt hieman, mikä taas voi vaikuttaa rakennustavan mahdollisuuksiin. Käytäntöjen ja tulkintojen nähtiin vaihtelevan kunnittain.

Kaavamääräykset voivat myös suosia modulaarista rakentamista. Tästä esimerkkinä on ulokkeiden, sisäänvetojen ja siltamaisten rakenteiden vaatiminen. Tällaiset rakenteet ovat helpompia ja taloudellisempia toteuttaa itsensä kantavilla moduuleilla. Kaavoja laativien kuntien työntekijöiden lisäksi myös muilla viranomaisilla ja päättäjillä nähtiin olevan merkittävä rooli uusien innovaatioiden koelussa ja leviämässä. Merkittävimpänä keinona heillä on tontinluovutukseen liitetyt ehdot.

Toteutustavan valintaan vaikuttavista asioista nousi selkeästi useimmin esiin vaihtoehtojen rakennuskustannukset. Mielikuvat modulaarisen rakentamisen kustannuksista vaihtelivat paljon. Aikatauluihin liittyvät asiat vaikuttivat toteutustapaa koskevaan päätökseen kustannustekijöiden jälkeen toiseksi useimmin. Erityisesti kiireellisen aikataulun kohteissa modulaarisen rakentamisen mahdollistama aikasäästö voi nousta jopa ratkaisevaksi valintaan vaikuttavaksi asiaksi. Pitkälti kiireellisen aikataulun vuoksi modulaarisesti tehdyistä kohteista on Suomessakin kokemusta (Mediuutiset 2011). Kolmanneksi useimmin toteutustavan valintaan nähtiin vaikuttavan toimittajayritykseen liittyvät asiat kuten kokemus, taloudellinen tilanne ja yrityksen koko. Myös tontilla oleva asemakaava ja mielikuvat toteutustavan sopivuudesta haluttuihin suunnitelmataratkaisuihin nostettiin haastatteluissa esille valintaan vaikuttavina tekijöinä.

5.2.2. Vahvuudet ja heikkoudet

Tutkimuksessa selvitettiin vastaajien näkemyksiä modulaarisen rakentamisen vahvuuksista ja heikkouksista. Positiivisia ominaisuuksia nostettiin keskimäärin 2,9 kappaletta vastaajaa kohden. Vastaajien mielestä modulaarisen toteutustavan tärkeimmät vahvuudet ovat 1) säältä suojassa tapahtuva rakentaminen ja sen myötä tuleva varmuus kosteusvauriottomasta rakennuksesta, 2) rakentamisajan nopeus ja 3) mahdollisuus saavuttaa hyvää laatua tasaisen varmasti.

Heikkouksia kirjattiin keskimäärin 2,4 kappaletta vastaajaa kohden. Vastaajien näkemys modulaarisen toteutustavan heikkouksista liittyi 1) rakennustavasta saatujen kokemusten puutteeseen pitkällä aikavälillä ja ongelmatilanteissa, 2) käsitykseen, että arkkitehtisuunnittelu on monotonista ja kankeaa sekä 3) kustannuksiin.

Modulaarisella rakentamisella nähtiin selkeitä etuja paikalla rakentamiseen verrattuna, mutta samalla sillä nähtiin myös joitakin negatiivisia ominaisuuksia. Monet negatiivisista mielikuvista olivat kuitenkin sellaisia, että ne voivat muuttua nopeasti, kun valmiit kohteet osoittautuvat toimiviksi.

Tutkimuksen tulokset olivat pitkälti linjassa tutkimuskirjallisuuden kanssa, mutta poikkeuksiakin löytyi. Tulosten merkittävimmät poikkeukset kansainvälisiin tutkimuksiin olivat seuraavia: haastatellut eivät tunnistanee ekologisuutta eivätkä kustannusten sekä aikataulun parempaa ennustettavuutta modulaarisen rakentamisen vahvuudeksi, ja haastatellut eivät tunteneet vielä hyvin modulaarisen arkkitehtisuunnittelun mahdollisuuksia.

5.2.3. Hankkeiden kilpailutus

Vuokrakerrostalomarkkinoilla toteutetaan paljon valtion tukemia kohteita, joissa rakennusurakat pitää lähtökohtaisesti kilpailuttaa (RT RakMK-210191 1998). Suosituin tapa täyttää tämä vaatimus on kilpailuttaa kokonaisurakka valmiilla tai lähes valmiilla suunnitelmillä. Tämän tavan vahvuuksina pidettiin selkeyttä ja helppoutta. Koska tällaiseen urakkakilpailuun pitää vastata täysin suunnitelmien mukaan, ei modulaarisilla ratkaisuilla ole mahdollisuutta osallistua. Tämä johtuu siitä, että suunnitelmat laaditaan lähtökohtaisesti paikalla rakentamisen näkökulmasta. Modulaarisissa hankkeissa kilpailutus onnistuu vain tavoilla, joissa suunnittelu kuuluu toteuttajan vastuulle. Joissain vastauksissa tuli esiin, että tilaajat epäilevät näissä urakkamuodoissa suunnitelmaohjeisiin ja mahdollisiin luonnoskuviin jäävän puutteita, jotka lisäävät lisä- ja muutostöiden määrää ja sitä kautta kustannuksia. Lisäksi näissä vaihtoehdoissa urakoitsijoilla on suurempi mahdollisuus valittaa päätöksistä. Vastaajat näkivät, että tilaajien kilpailutusosaamista voidaan vielä kehittää käytettävissä suunnittelun sisältäviä urakkamuotoja. Tilaajia pitäisikin ohjeistaa moduulirakentamisen eduista ja sen erityispiirteistä.

5.2.4. Yhteenveto

Seuraavassa (taulukko 5.2.) on esitetty tutkimuksen tulosten ja kirjallisuuden perusteella tehty modulaarisen rakentamisen SWOT-analyysi suomalaisille vuokrakerrostalomarkkinoille.

Tutkimuksen tulosten perusteella modulaarisella rakentamisella on hyvät mahdollisuudet saada laajempaa suosiota vuokrakerrostalomarkkinoilla. Tutkimukseen osallistuneet henkilöt pääosin uskoivat, että rakentaminen tulee menemään tulevaisuudessa enemmän tehdasrakentamisen ja modulaarisen rakentamisen suuntaan. Modulaarisella kerrostalorakentamisella ja uusilla toimijoilla on kuitenkin käsillä erittäin tärkeä vaihe. Kokemukset ensimmäisistä kohteista vaikuttavat erittäin paljon siihen, miten potentiaaliset asiakkaat näkevät modulaarisen kerrostalorakentamisen ja yksittäiset ratkaisut. Onnistumiset tuovat varmasti positiivista julkisuutta ja poistavat epävarmuutta uutta teknologiaa kohtaan. Tämä voi avata modulaariselle rakentamiselle suuria mahdollisuuksia vuokrakerrostalomarkkinoilla.

Taulukko 5.2. SWOT-analyysi modulaarisesta rakentamisesta vuokrakerrostalomarkkinoilla

VAHVUUDET

- SÄÄLTÄ SUOJASSA TAPAHTUVA RAKENTAMINEN
- VARMUUS TEHDASTUOTANNON TUOTTAMAN LAADUN TASAISUUDESTA
- PAREMMAT MAHDOLLISUUDET AIKATAULUN PITÄMISEEN JA VALMIINA LUOVUTTAMISEEN
- NOPEA TYÖMAAVAIHE
- EKOLOGISUUS – TEHOKKAAMPI MATERIAALIEN KÄYTTÖ JA VÄHÄISEMPI KAATOPAIKKAJÄTTEEN MÄÄRÄ

HEIKKOUEDET

- KOKEMUSTEN PUUTE UUSISTA RATKAISUISTA
- VÄHÄISET TIEDOT MODULAARISEN ARKKITEHTUURIN MAHDOLLISUUKSISTA
- SOPIMATTOMUUS VALMIILLA SUUNNITELMILLA TEHTÄVÄÄN URAKKAKILPAILUUN
- MODULAARISET RATKAISUT JA PROJEKTIEEN ERITYISPIIRTEET EIVÄT OLE VIELÄ TUTTUJA TILAAJILLE JA SUUNNITTELIJOILLE

MAHDOLLISUUDET

- MODUULIRAKENTAMISEN MAHDOLLISTAMAN ARKKITEHTUURIN YLEISTYMINEN
- TYÖMAAVALTAISEN RAKENTAMISEN IMAGON HEIKKENEMINEN
- LAATUIMAGON MUODOSTUMINEN
- VIRANOMAISTEN JA PÄÄTTÄJIEN KIINNOSTUKSEN KASVU
- TILAAJIEN KILPAILUTTAMISEN KEHITTYMINEN SUUNNITTELUN SISÄLTÄVIEN PROJEKTIMUOTOJEN KÄYTÖN SUUNTAAN
- TILAAJIEN KILPAILUTTAMISEN KEHITTYMINEN SUUNNITTELUN SISÄLTÄVIEN PROJEKTIMUOTOJEN KÄYTÖN SUUNTAAN
- MARKKINOIDEN PIRISTYMINEN ESIMERKIKSI VALTION TUKIEHTOJEN MUUTTUESSA

UHKAT

- YKSITTÄISTEN PROJEKTIEEN VAKAVAT EPÄONNISTUMISET ALKUVAIHEESSA JA NIISTÄ SEURAAVA HUONO JULKISUUS
- KAAVOITUKSEN JA RAKENNUSLUPAVIRANOMAISTEN EPÄSUOTUISAT TOIMET JA JOUSTAMATTOMUUS
- VALTION EPÄEDULLISTEN TUKIEHTOJEN JA MUIDEN UUDISTUOTANNON HIDASTEIDEN ESIINTYMINEN VIELÄ PITKÄÄN
- ALALLA EI OLE SUOMESSA KOULUTUSTA, MIKÄ VOI HIDASTAA OSAAMISEN KEHITTYMISTÄ

5.2. MODULAARINEN RAKENTAMINEN YRITYSVERKOSTON TOTEUTTAMANA

Jaakko Sorri ja Kalle Kähkönen, TTY

Modulaarinen teräskennorakentaminen voi edellyttää mittavan alihankintaverkoston. Tässä luvussa käsitellään tutkimustuloksia käytännön kokemuksista ja opeista tällaisen verkoston kehittämisestä ja toiminnasta. Tutkimuksessa kerättiin eri osapuolia haastatteleamalla kokemuksia siitä, mikä yritysverkoston toiminnassa on toiminut hyvin, mihin on liittynyt erityisiä haasteita, ja mitä menneistä projekteista voidaan oppia. Aluksi käsitellään hieman modulaarisen ja teollisen rakennustuotannon taustaa. Tämän jälkeen käsitellään tutkimuksen kohteina olleista projekteista tehtyjä havaintoja ja näihin liittyviä johtopäätöksiä.

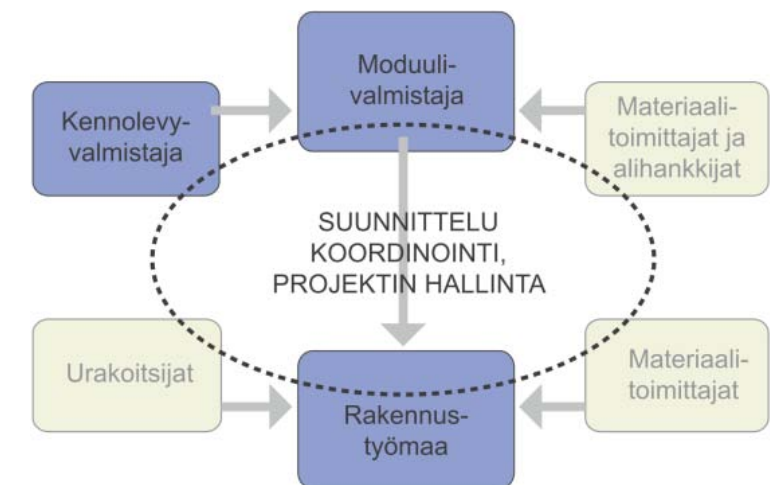
Rakennusalaan luonnehditaan usein toimialana, jossa uudet innovaatiot ja uudet toimintatavat leviävät laajaan käyttöön varsin hitaasti (Sheffer 2011). Jo 1900-luvun alkupuolella odotettiin, että asuntotuotanto seuraisi autoteollisuuden kehitystä, jossa teolliset tuotantomenetelmät olivat mullistaneet liiketoiminnan ja mahdollistaneet huomattavan tuottavuuskehityksen (Schnaars 2009). Nopeaa mullistusta ei kuitenkaan vielä silloin tapahtunut. Työn tuottavuuskehityksen on nähty olleen hidasta rakennusosalalla myös viime vuosikymmeninä (Koskenvesa et al. 2010). Loppuasiakkaalle lisäarvoa tuottamatonta hukkaa ovat esimerkiksi niin ihmisten kuin tuotteidenkin ylimääräinen liikuttaminen, odottelu, virheiden korjaaminen, yliprosessointi ja ylituotanto (Taj & Berro 2006). Tutkimusten mukaan rakennustyömailla työskentelevillä huomattava osa työajasta kuluu muuhun kuin heidän varsinaisen työnsä tekemiseen: esimerkiksi materiaalien ja työkalujen etsimiseen ja siirtelyyn, odotteluun, sosiaaliseen kanssakäymiseen ja omaa työtä edistämättömään kuljeskeluun (esim. Hewage & Ruwanpura 2006).

Moduulirakentamisessa valmistusta pyritään viemään mahdollisimman suuressa määrin tehdasolosuhteisiin (Steel Construction Institute 2000). Tehtaassa olosuhteet ovat rakentamisen kannalta suotuisat koko ajan, valmistusprosessit ovat läpinäkyvämpiä ja niitä voi olla työmaata helpompi myös kehittää. Aiempiin vuosikymmeniin verrattuna moduulirakentamisen kilpailukykyisyyttä voi arvioiden mukaan olla parantanut ainakin rakentamisen tietomallien kehitys (BIM), nykyaikaiset rakennusmateriaalit, ekologisuuteen liittyvät tavoitteet sekä entistä sofistikoituneemmat valmistusprosessit (ks. McGraw-Hill Construction 2011). Alhaiset kustannukset ja

tehokkuus voivat olla modulaarisen rakentamisen keskeinen etu (Boyd et al. 2012; Lawson et al. 2011), mutta automaattisesti tätä etua ei modulaarisessa rakentamisessakaan saavuteta (ks. Schnaars 2009). Modulaarisen rakentamisen potentiaalisia kustannusetuja menetetään, jos osa käytetyistä ratkaisuista ei sovellukaan hyvin modulaarisesti toteutettavaksi, tai jos jo toteutettuja ratkaisuja joudutaan purkamaan. Kilpailukykyiseen kustannustasoon pääsy ja sen ylläpito edellyttävät teollisessa toiminnassa jatkuvaa parantamista.

Modulaariseksi suunnittelu, tehdasvalmistus ja rakentaminen edellyttävät toisenlaisia toimintamalleja, kuin miten työmaapainotteisesti rakennettaessa on totuttu toimimaan, jotta teollisen rakentamisen hyödyt saavutettaisiin mahdollisimman laajalti. Saatetaan tarvita mm. syvempää yhteistyötä eri osapuolten kesken. (Arif et al. 2012).

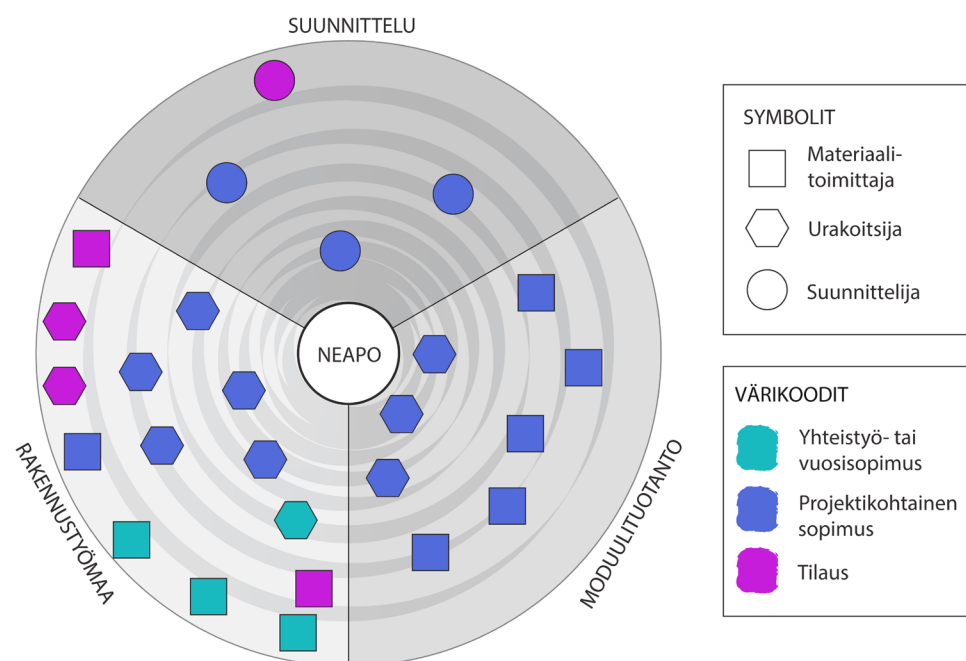
Tässä osuudessa tarkemmin tutkittavana oli kaksi NEAPO Oy:n toteuttamaa asuntokäyttöön tulevaa moduulikerrostaloprojektia, jotka molemmat valmistuivat vuonna 2012. Näistä ensimmäinen oli Vantaan Viertolaan rakennettu kolmen kerrostalon ja piharakennuksen kokonaisuus. Kohde oli alun perin suunniteltu toteutettavaksi betonista, mutta se muutettiin modulaariseksi sen jälkeen, kun tilaaja teki sopimuksen toteuttajayrityksen kanssa kohteen rakentamisesta. Toisena tarkasteltavana projektina oli Helsingin Myllypuroon valmistunut viisikerroksinen kerrostalo, jonka NEAPO on myös toteuttanut moduuliratkaisuun. Tämä kohde on suunniteltu alusta saakka teräskennorakenteisena. Sekä asunomoduulit että hissitorni ja porraskäytävämoduulit on valmistettu tehtaalla. Kerrostalon alle on rakennettu osittain maanalainen autohalli, kaavaan kirjatun autopaikkavolteen vaatimusten mukaisesti.



Kuva 5.1. Toimitusketju molemmissa rakennusprojekteissa.

Tutkimuksen kohteena olevaa modulaarista asuntotuotantoa koskevan yritysverkoston voidaan nähdä koostuvan pääpiirteissään kolmesta kokonaisuudesta; nämä ovat suunnitteluun, tehdasto- teutukseen sekä työmaatoteutukseen liittyvät yritykset. Moduule- ja koskeva toimitusketju on muodostunut sellaiseksi, että FIXCEL®- teräskennoelementit on valmistettu Uudessakaupungissa. Sieltä ne on kuljetettu moduulitehtaille. Valmistusprosessin jälkeen moduulit on kuljetettu työmaille.

NEAPO on määritellyt omaksi toiminta-alueekseen innovatiivis- ten modulaaristen rakennusratkaisujen ja -palveluiden kehittämi- sen, markkinoimisen ja toimittamisen (www.neapo.fi). Käytännös- sä yhtiön toteuttamissa rakennuksissa on siis sekä suunnittelu että toteutus tehty monen yrityksen yhteistyönä. Yhtiö on hankkinut yri- tysverkostostaan osaamista arkkitehtisuunnitteluun sekä teettänyt alihankintana taloteknistä suunnittelua ja rakennesuunnittelua. FIX- CEL-kennojen valmistus tapahtuu yhteistyössä uusikaupunkilaisen Oy Shippax Ltd:n kanssa, joka on myös yksi NEAPON omistajista. Moduulivalmistusta NEAPO on ostanut alihankintana eri yrityksiltä.



Kuva 5.2. Sopimussuhteinen yritysverkosto toisessa tutkitussa rakennusprojektissa kategorisoituna aihealueen, tuotoksen sekä sopimuksen luonteen perusteella.

Yritysverkostoa tarkasteltiin yritysverkoston pika-analyysi-menetel- mällä (ks. Kähkönen et al. 2007). Kahden tutkitun projektin välillä oli merkittäviä eroja yritysverkoston rakenteessa. Vantaalle rakenne- tussa kohteessa yhtiöllä oli 140 kumppania ja 26 sopimussuhdetta. Helsingin Myllypuron kerrostalossa oli 90 kumppania ja 22 sopimus- suhdetta. Siinä missä ensimmäisessä projektissa monet pienetkin hankinnat hoidettiin NEAPON kautta, jälkimmäisessä projektissa yh- tiö teki tietoisesti laajempia sopimuskokonaisuuksia. Kumppaneissa on ollut vaihtuvuutta projekteittain kaikilla osa-alueilla: suunnittelus- sa, moduulituotannossa ja työmaatoteutuksessa. Pääosa yhtiön te- kemistä sopimuksista on ollut projektikohtaisia sopimuksia.

Työmaatyön näkökulmasta modulaarinen rakentaminen ei näiden projektien projektipäälliköiden näkemysten mukaan poikennut olen- naisesti tavanomaisemmasta rakentamisesta. Molemmissa projek- teissa työmaille olisi ollut edellytykset asentaa moduuleja nopeam- paan tahtiin kuin mitä moduulituotanto pystyi moduuleja työmaille toimittamaan. Työmaatyön osuus tontilla on moduulien käytön takia esimerkiksi elementtikerrostalorakentamista selvästi lyhyempi, mut- ta työmaalla tehtävä työ sinänsä on pitkälti samanlaista kuin muilla- kin rakennustyömaille. Esimerkiksi perustustöiden tekeminen ei riipu siitä, toteutetaanko kohde modulaarisesti vai jollain muulla tavalla. Tarkastelluissa projekteissa toisessa tehtiin paikan päällä betoninen autohalli kellarikerrokseen, ja kaavamääräysten vuoksi seinät rapat- tiin. Molemmissa projekteissa tehtiin vesikatot työmaalla. Tulevai- suudessa yhtiön tavoite on saada esivalmistusastetta edelleen nos- tettua ja työmaatyön osuutta vastaavasti vähennettyä.

FIXCEL-kennoja valmistavan tehtaan kannalta nousivat esiin tietoi- tarpeet, joita liittyy yritysverkostossa toimimiseen. Tietoa pitää saa- da välitettyä sopivassa muodossa tietoa tarvitseville tahoille tarpeen mukaisena ajankohtana. Nykyinen toimintamalli suurelementtien val- mistuslinjalla on edellyttänyt sitä, että asuntomoduli-kohtaiset pii- rustukset ovat tehtyinä siinä vaiheessa kun elementtejä aletaan val- mistaa ja siirtää edelleen sahaukseen. Muussa tapauksessa teräs- kennolevyjä valmistavalla tehtaalla joudutaan tekemään ylimääräistä työtä suurelementtien siirtelyssä. Tehtaan tehokkuuden kannalta on- kin tärkeää, että esimerkiksi tarvittavat suunnitelma- ja kuvata- te- taan käytettävissä oikeaan aikaan. Toisinaan materiaaleihin (esim. RHS-putket ja ruuvit) liittyy esimerkiksi rakenteellisista syistä erityi- siä vaatimuksia. Erityisvaatimukset on syytä kuvata suunnitelmissa erikseen, mikäli sellaisia on. Erityismateriaaleihin liittyvistä vaatimus- tasoista tulee tiedon olla myös erityisen ajoissa, jotta poikkeavat materiaalit voidaan tilata riittävän ajoissa ja ilman lisäkustannuksia.

Yksi kiinnostava, epäsuorasti monin tavoin esiin noussut teema oli ”perinteiseen rakentamiseen” ja moduuleja valmistavaan teollisuuden liittyvät kulttuurierot. Kulttuurieroja on ilmennyt esimerkiksi sen osalta, millaisista asioista on totuttu informoimaan ja millaisista ei. Vaikutti siltä, että moduulitehtailla odotetaan muun muassa yksityiskohtaisempia tietoja asennustöitä varten kuin mitä perinteisessä rakentamisessa on työmailla asentajille käytännössä tavattu antaa. Tästä herää kysymys, millaisen toimintamallin mukaan jatkossa kannattaisi toimia. Jos myös pienet detaljit määriteltäisiin ennalta, asentajan ei tarvitsisi kuluttaa aikaa asian miettimiseen. Määrittelyjä on mahdollista tehdä paitsi tapauskohtaisesti, myös luomalla erilaisia yleispäteviä ”sääntöjä” siitä, miten mitkään yksityiskohdat normaalisti toteutetaan. Näin lopputulos olisi entistä vähemmän riippuva siitä, kuka on ollut asentajana.

Suunnitteluratkaisujen pääpiirteet pitää modulaarisessa rakentamisessa jäädyttää jo projektin aikaisessa vaiheessa (Venables et al. 2004), jotta turhan työn määrä ei kasvaisi. Jälkikäteen tehtävä muutos yhdessä kohdassa voi modulaarisen ratkaisun kohdalla tietää muutostarpeita muuallakin. Rakennusallalla on usein tehty muutoksia suunnitelmiin vielä myöhäisissä vaiheissa, vaikka tätä pyritäänkin välttämään. Muutoksia sen välillä, miten piirustuksissa oli alun perin ollut, ja miten oli lopulta nähty hyväksi neuvottelujen jälkeen tehdä, oli ainakin toisessa tarkastellussa projektissa tehty moduulivalmistusvaiheessa vielä kohtalaisen paljon. Moduulitehtaalla yhdeksi juurisyyksi suureen muutosten määrään nähtiin modulaarisen suunnittelun koordinointiin liittyvät haasteet.

Taulukko 5.3. Teollisen moduulirakentamisen ja perinteisen rakentamisen eräiden piirteiden vertailua.

MODUULIRAKENTAMINEN	TYÖMAAPAINOITTEINEN RAKENTAMINEN
SUURI OSA LOGISTISISTA VIRROISTA KULKEE TEHTAILLE, JOSTA NE TUODAAN MODUULEINA TYÖMAILLE	TYÖMAA ON LOGISTIIKAN JA TYÖN KESKUS, VAIKKA ESIVALMISTETTUJA MATERIAALEJA HYÖDYNNETTÄISIINKIN
KENNO- JA MODUULITEHTAILLA TYÖNTEKIJÄT TEOLLISEN TUOTANNON OSAAJIA	TYÖMAAN TYÖNTEKIJÄT TYÖMAATOIMINNASSA AMMATTILAISIA
TEHTAALLE ANNETTAVIEN SUUNNITELMIEN TULISI SISÄLTÄÄ KAIKKI TEKEMISEEN TARVITTAVA TIETO JA OLLA SELLAISENAAN TOTEUTUSKELPOISIA	SUUNNITELMAT VOIVAT KÄYTÄNNÖSSÄ OLLA OSIN ERÄÄNLAISIA ”RAAMEJA”. TYÖNTEKIJÄ SAATTAÄ VOIDA VALITA TILANTEESEEN SOPIVIMMAKSI NÄKEMÄNSÄ TOTEUTUSTAVAN.
PYRKIMYKSENÄ SE, ETTÄ TOTEUTETTU RATKAISU ON TEKIJÄSTÄ RIIPPUMATTA SAMA (PIIRUSTUKSET)	TOTEUTETTU RATKAISU VOI RIIPPUA ENEMMÄN TEKIJÄSTÄ (ESIM. JOHTOJEN TAI PUTKIEN REITIN TARKKA SIJAINTI)

Keskeisimpänä teemana yritysverkoston toiminnan kehittämisen kannalta nousi esiin se, että suunnitteluun kaivataan entistä enemmän sellaista kokonaisnäkemyksellistä johtamista, jossa otetaan huomioon jo alusta asti suunnittelun kaikilla tasoilla modulaarinen toteutettavuus ratkaisuin. Tähän sisältyy sekä suunnittelutyön koordinointi että suunnitelmien yhteensovittaminen. Asiaan liittyy sekä suunnittelu tehdasvalmistuksen kannalta että suunnittelu työmaa-asennettavuutta silmällä pitäen. Tavoitteena on minimoida virheitä ja valmistusvaiheen ylimääräistä työtä, kuten jo valmistettujen rakenteiden purkua. Suunnittelua koordinoitaessa tulisi kyetä auttamaan niin tehtaita kuin työmaavaiheita kustannusten hallinnassa.

Modulaarisen rakentamisen yhtenä kustannusetuna on aiemmin nähty se, että yhtenäisten suunnitteludetaljien käyttö voi vähentää erikoistuneen suunnittelun tarvetta (The Steel Construction Institute 2000). Jatkossa hyvien suunnitteluratkaisujen löytäminen oletettavasti helpottuu suunnitelmakirjaston kartuttamisen myötä, jota Concells-hankkeessakin on tehty.

5.3. ELINKAARINÄKÖKULMA MODUULIRAKENTAMISEEN

Juhani Heljo, TTY

Modulaarinen rakentaminen tuo uusia muuntelumahdollisuuksia rakennuksen käyttöikäsuunnitteluun. Elinkaarikustannusten osalta positiiviset vaikutukset tulevat pääasiassa rakennusvaiheen nopeutumisesta, mahdollisuuksista alentaa rakennusten perustarvustannuksia ja moduulien uudelleenkäyttömahdollisuuksista. Runkoratkaisulla ei suoraan ole oleellista vaikutusta elinkaarikustannuksiin. Epäsuorasti tulee kuitenkin vaikutuksia mm. pintaratkaisuvaihtojen, paloturvallisuusratkaisujen ja talotekniikan reititysratkaisujen kautta.

Rakennusten elinkaarisuunnittelu sisältää mm. käyttöikäsuunnittelun, elinkaarikustannusten optimoinnin (Life Cycle Cost, LCC) ja elinkaariarvioinnin (Life Cycle Assessment, LCA). Osa elinkaarisuunnittelusta tulostuu rakentamismääräysten osan A4 (Rakennusten käyttö- ja huolto-ohje) mukaiseen käyttö- ja huolto-ohjeeseen.

5.3.1. Käyttöikäsuunnittelu

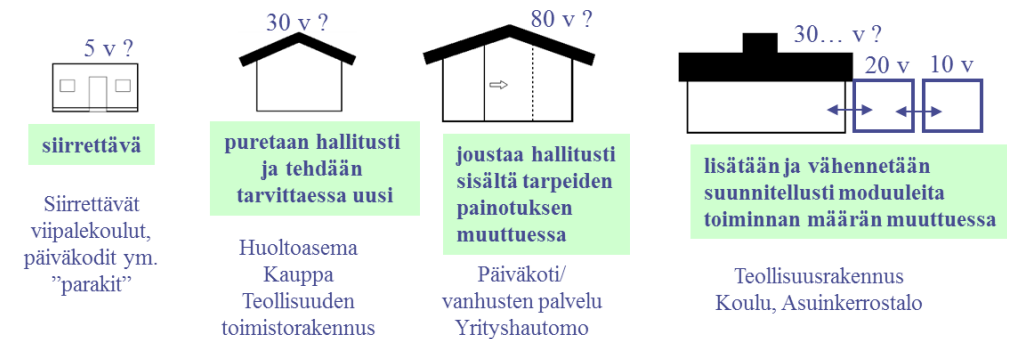
Rakennukselle määritetään käyttöikätaavoite suunnittelun pohjaksi. Käyttöikätaavoitteeseen vaikuttavat mm. rakennustyyppi, sijainti, alueen kehittyminen, käyttötarkoituksen pysyvyys, toimintojen vaihtuvuus, alueen kehittyminen sekä rakennuksen ja alueen kulttuurihistoriallinen ja arkkitehtoninen laatu ja merkitsevyys.

Mitä pidempi käyttöikätaavoite asetetaan, sitä tärkeämmäksi rakennuksen muuntojoustavuuden toteuttaminen tulee. Tällöin vaihtoehtoina ovat sisätilojen muuntojoustavuus tai tilamoduuleiden lisäys ja poisto (kuva5.3.).

Asuntojen muuntojoustavuudesta on puhuttu paljon, mutta käytännössä muuntojoustavuus on toteutunut siten, että tarpeiden muuttuessa vaihdetaan asuntoa. Tarvemuutos on yleensä niin iso, että sitä ei hoideta asunnon muuntojoustavuuden avulla. Asuinrakennuksia on sitä vastoin muunneltu. Alueilla, joilla asuntojen tarve on vähentynyt, on asuinvuokrakerrostaloista purettu pois rakennuksien osia. Ulkomailla tätä on usein tehty slummiutuvilla asuinkeuhkeroalaeilla, ja näin on saatu parannettua alueiden ilmettä ja laatutasoa.

Viime vuosina Suomessa on yleistynyt toisensuuntainen alueiden perustarantaminen. Vanhoja kolmikerroksisia asuinrakennuksia on korotettu 1-2 kerroksella osana täydennysrakentamista. Elinkaarinäkökulmasta näissä voi muodostua ongelmaksi se, että alle jäävän vanhan osan odotettavissa oleva käyttöikä on lyhyempi kuin päälle rakennetun korotusosan. Korotukset on mahdollista tehdä moduuleilla. Jos korotukseen käytetään moduuleita, ne on mahdollista siirtää pois uutta käyttöä varten, kun alle jäänyt vanha osa päätetään purkaa.

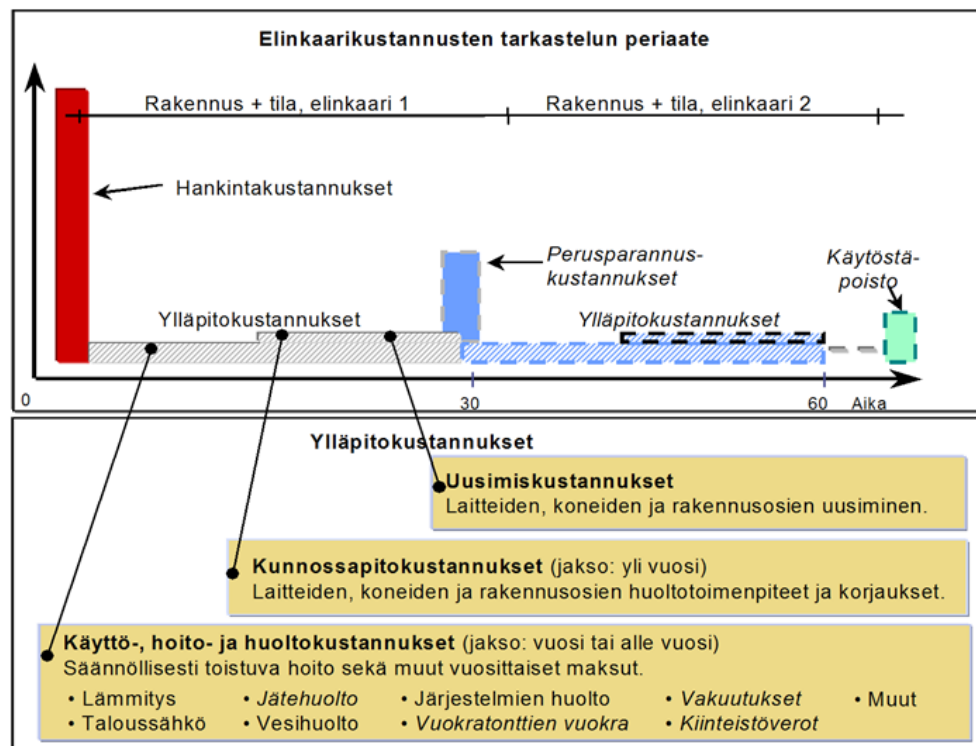
Rakennuksen käyttöikä ja muuntojoustavuus



Kuva 5.3. Rakennuksen käyttöikä ja muuntojoustavuusvaihtoehtoja. Moduulirakentaminen tuo uusia mahdollisuuksia muuntojoustavuuteen.

5.3.2. Elinkaarikustannukset

Elinkaarikustannuksia voidaan tarkastella eri jaksoilla. Usein elinkaariksi käsitetään rakennuksen vaiheet raaka-aineiden hankinnasta ja tuottamisesta purkujätteiden loppukäsittelyyn asti (whole life). Usein tarkastellaan kuitenkin vain kuviteltua ”perusparannusväliä” (kuva 5.4.). Näitä jaksoja voidaan kuvitella olevan 2-3 rakennuksen käyttöajan aikana.



Kuva 5.4. Rakennuksen elinkaarikustannukset ja niiden jaottelu. Perusparannus toteutetaan asuinvuokrakerrostaloissa tyypillisesti kerralla. Muissa rakennuksissa perusparannustoimenpiteet jakaantuvat usein pidemmälle ajanjaksolle.

Modulaarisen teräskennoratkaisulla toteutetun rakennuksen elinkaarikustannukset eivät eroa merkittävästi muulla tavalla toteutetuista rakennuksista. Joitakin eroja kuitenkin on.

Hankintakustannusten osalta ei pystytä sanomaan, pystytäänkö modulaarisella ratkaisulla alempaan kustannustasoon kuin muilla ratkaisuilla. Rakentamisprosessin nopeutuminen, rakentamisen teollistaminen ja virheiden vähentäminen mahdollistavat kustannusten alenemisen. Lisäkustannusta muodostuu mm. erikoiskuljetuksista sekä tuplarakenteista välipohjissa ja asuntojen välisissä seinissä.

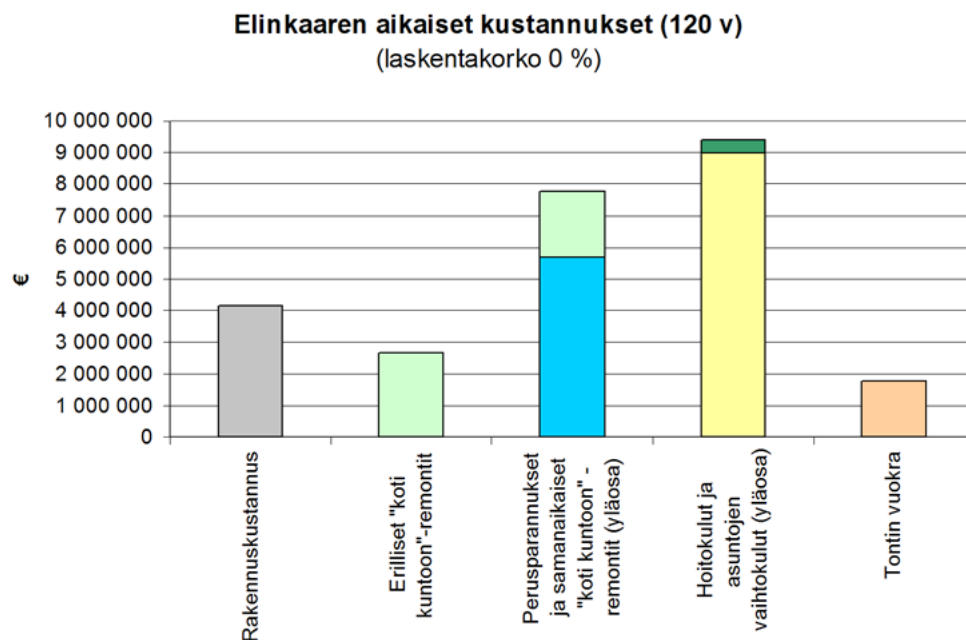
Käyttö-, hoito- ja huoltokustannukset nousevat hieman, jos asuntoihin asennetaan sprinklerijärjestelmä ja koneellinen jäähdytys modulaarisen teräskennoratkaisun takia. Jäähdytystarve on kevyissä rakennuksissa suurempi kuin esim. massiivisissa betonirakennuksissa. Sprinklerijärjestelmän perusteella saa alennusta sekä kiinteistön vakuutusmaksuihin että huoneistokohtaisiin irtaimistovakuutusmaksuihin. Sprinklerijärjestelmä lisää hieman vesivahinkoriskejä. Riskejä voi pienentää käyttämällä sumutejärjestelmää, josta tulee huomattavasti vähemmän sammutusvettä. Vakuutusmaksut ovat todennäköisesti alemmat kuin puurunkoisissa rakennuksissa.

Kunnossapitokustannukset ja uusimiskustannukset riippuvat valituista laitteista ja pintaratkaisuista. Kipsilevyjen päällä olevien pintojen uusiminen voi aiheuttaa lisäkustannusta betonipintoihin verrattuna, jos kipsilevyt rikkoontuvat. Tähän kannattaa kiinnittää huomiota tehtäessä sisäpintojen levytysratkaisuvaihtoja. Vuokrataloissa sisäpinnat voidaan uusia noin 20 vuoden välein ja korjata mahdolliset vauriot asukkaiden vaihtuessa. Vuokrataloissa korjauskustannukset muodostavat suuren osan hoitokuluista. Valituilla ratkaisuilla vaikuttaa korjauskustannusten määrään.

Perusparannusvaiheessa uusitaan suuri osa LVI-järjestelmästä. Tällöin rakennusteknisistä töistä syntyy huomattavasti kustannuksia LVI-tekniikan töiden lisäksi. Rakennustekniikan töiden osuus esim. putkiremontin kokonaiskustannuksista saattaa olla lähes puolet. Rakennusteknisiä kustannuksia syntyy, kun putkien ja kanavien uusimisen ja korjauksen takia joudutaan rikkomaan rakenteita. Tätä pitää välttää. Modulaariseen rakentamiseen pitää liittää modulaarinen talotekniikan reititys, jossa otetaan huomioon tulevaisuuden putkiremontit (RIL 239-2008). Kennorakenteen onteloita voidaan hyödyntää osana reitityksiä. Tavoitteena pitää olla, että putket voidaan uusida rakenteita rikkomatta.

5.3.3. Elinkaarikustannusten merkitys

Valintoja tehtäessä pääpaino on rakennuskustannuksilla. Elinkaari-kustannusten merkitys päätöksenteossa on edelleen vähäinen. Sel-laiset kiinteistönomistajaryhmät, jotka pitävät kiinteistöt pääsääntöi-sesti purkamiseen asti, ottavat kuitenkin jo elinkaarikustannuksetkin huomioon. Tällä hetkellä elinkaarikustannusten tarkastelu on kuiten-kin vielä hankalaa kunnollisten laskentaohjelmien, tiedon ja yhte-näisten laskentatapojen puuttuessa. Vaikka nämä olisivat olemas-sa, perusongelmaksi jää kuitenkin vielä, miten päätöksenteossa pai-notetaan kaukana tulevaisuudessa syntyviä kustannuksia ja tuottoja. Esimerkiksi 4 %:n laskentakorkoa käytettäessä 40 vuoden päästä syntyvällä kustannuksella on vain 20 %:n painoarvo sen todellises-ta kustannuksesta päätöksenteossa. Vastaavasti 80 vuoden päästä syntyvällä kustannuksella on enää 4 %:n painoarvo. Kustannukset toteutuvat kuitenkin täysimääräisenä. Tampereen Vuokratalosäätiöl-le tehdyn laskentamallin mukaan elinkaarikustannukset ovat asuin-vuokrakerrostalossa 120 vuoden aikana kuusinkertaiset rakennus-kustannukseen verrattuna (kuva 5.5.).



Kuva 5.5. Asuinvuokrakerrostalon elinkaarikustannuslaskelma. Laskelma perustuu Tampereen Vuokratalosäätiön kustannustietoihin ja korjausmenettelyyn, jossa 20 vuoden välein tehdään asuntoihin "koti kuntoon"-remontti ja 40 vuoden välein laajempi perusparannus. "Koti kuntoon"-remontti sisältää pintojen ja kalusteiden uusimisen.

Elinkaarikustannusten näkökulmasta oleellista on, kuinka pitkä käyt-töikä asuinrakennusten modulaarisella rakentamisella tai asuntomo-duuleilla saavutetaan ja kuinka helppo asuntomoduuleja on korjata ja huoltaa. Tällöin ratkaisevaa ei ole runkorakenne vaan moduulien pintarakenteet ja varusteet sekä talotekniikan reititykset.

5.3.4. Elinkaariarviointi (LCA)

Elinkaariarviointia (Life cycle Assessment, LCA) käytetään tuotteiden ympäristövaikutusten arviointiin lähtien raaka-aineiden valmis-tuksesta, edeten tuotteen tuotantoon, käyttövaiheeseen ja lopuksi päätyen tuotteen hävittämiseen/kierrättämiseen. Tarkasteltavia ym-päristövaikutuksia ovat yleisesti ilmastonmuutos, happamoituminen, rehevöityminen, raskasmetallit ym. Rakennusosien ja kokonaisten rakennusten ympäristövaikutusten arviointi on vielä mutkikasta, kun otetaan huomioon koko elinkaari. Ongelmina ovat, muun muassa il-maston lämpenemiseen liittyen, miten otetaan huomioon kierrätys, betonin karbonatisoituminen – eli hiilen sitoutuminen betoniin raken-nuksen purkamisen jälkeen – ja puun sitoma hiili. Tehtyjen tarkas-telujen perusteella rakenteet, joissa käytetään kantavana rakentee-na terästä, näyttävät sijoittuvan ilmastonmuutosvaikutusten osalta betonirunkoisten ja puurunkoisten ratkaisujen väliin. Rakentamisen ympäristövaikutusten arviointimenetelmät paranevat tulevaisuudes-sa. Nykyiset laskentaohjeet tulevat todennäköisesti korvautumaan il-mastovaikutusarviointimenettelyillä, joissa otetaan huomioon viimei-sin tieteellinen näkemys hiilensidonnasta ja eriaikaisten KHK-pääs-töjen ilmastovaikutusten laskennassa. Kehitystyö on vielä kesken. (Koskela et al. 2011).

5.3.5. Rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje

Rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje tarkoittaa Suomen Rakentamis-määräyskokoelman osan A4 mukaan kiinteistönpitoa tukevaa kiin-teistökohtaista asiakirjakokonaisuutta. Se sisältää suunnittelussa ja uudis- ja korjausrakentamisessa päätetyt kiinteistön elinkaaritalou-den perusteet. Siihen kootaan kiinteistön hoidon, huollon ja kunnos-sapidon lähtötiedot, tavoitteet, tehtävät ja ohjeet, sekä asukkaille ja tilojen käyttäjille annettavat ohjeet. Käyttö- ja huolto-ohjeessa joh-detaan rakennusosien ja laitteiden käyttöikätaivoitteista niiden kun-nossapitojaksot sekä edelleen tarkastusten ja huoltojen ohjelmat. Siinä esitetään hyvän energiatalouden ja sisäilmaston edellyttämiä hoito-, huolto- ja kunnossapitotehtäviä. Modulaarisessa rakentami-ssa on mahdollista tehdä normaalia parempi käyttö- ja huolto-oh-je, koska moduuli suunnitellaan tarkemmin ja kaikki asennetut mate-riaalit ja liitteet tunnetaan paremmin.

6.CONCELLS -VIRTUAALIHANKE

6.1. VIRTUAALIHANKKEEN ARKKITEHTONISET RATKAISUT

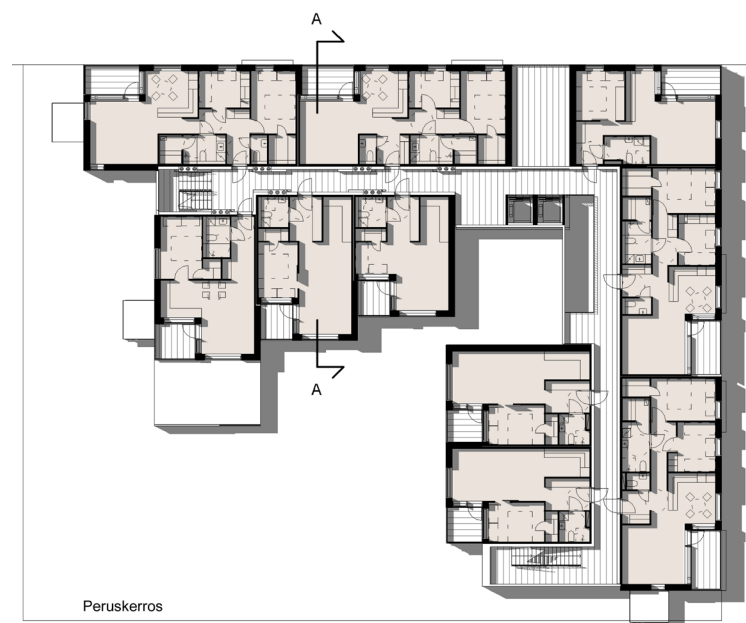
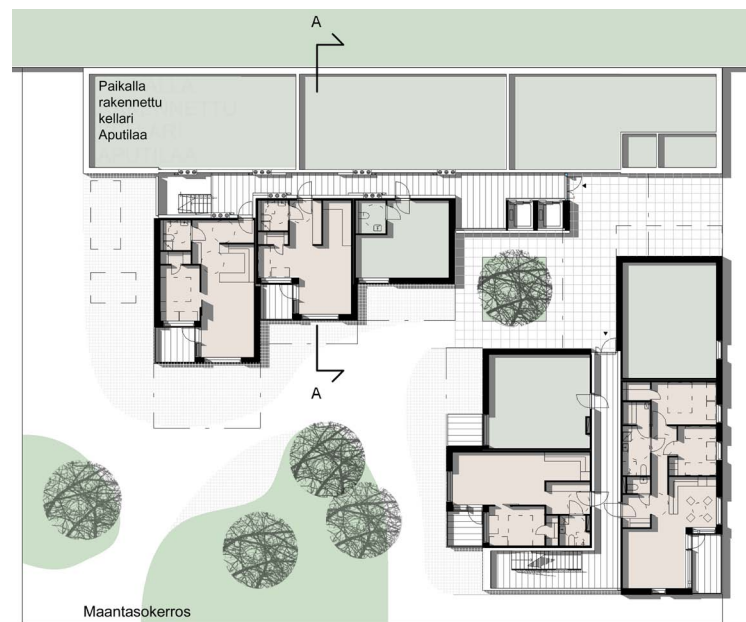
Ilona Karjalainen, Mari Matomäki ja Heli Bach,
Arkkitehtitoimisto Hedman & Matomäki Oy



Concells-virtuaalihankeessa tutkittiin moduulirakentamisen tarjoamia uusia mahdollisuuksia virtuaalisen rakennushankkeen avulla. Pohjana suunnittelijoiden yhteistyölle oli Arkkitehtitoimisto Hedman & Matomäki Oy:n tekemä suunnitelma rakennuksesta, johon oli koottu FIXCEL-teräskennorunkoisen modulaarisen kerrostalon avoimia kysymyksiä ja uusia ideoita: Mitkä ovat moduulin maksimimitat? Voisiko moduuleja sijoitella vapaammin toisiinsa nähden kuin asuntoja perinteisessä betonirakennuksessa? Suunnitelmassa oli ulokkeita, aukkoja rakennusmassassa, sisäänvedettyjä parvekkeita ja muita rakenteellisesti haastavia kohtia. Hanke eteni suunnittelukokousten rytmittämänä tavallisen rakennushankkeen tapaan. Projektin vetäjänä toimi Risto Rautio NEAPO Oy:stä ja pääsuunnittelijana Mari Matomäki Arkkitehtitoimisto Hedman & Matomäki Oy:stä. Suunnitteluryhmään kuuluivat myös LVIS-suunnittelija, projektiarkkitehti ja useita rakennesuunnittelijoita. Suunnittelukokouksia pidettiin noin kuukauden välein. Jokaisessa suunnittelukokouksessa kävi ilmi asioita, joita ei ilman virtuaalihankeä olisi tullut esille, ja suunnitelmaa kehitettiin havaintojen pohjalta ja ongelmakohtia ratkaisten pääpiirustuksista työpiirustusten kautta kohti detaljeja.

Projektin aikana saatiin uutta tietoa TTY:llä tehdyistä rakennekokeista. Moduuleja kuormitettiin eri suunnista rakenteellisten raja-arvojen selvittämiseksi. Suunnitelmaa muutettiin tuloksia vastaavasti, ja osittain etsittiin tiettyihin kohtiin sopivia erityisratkaisuja, kuten rakennushankkeissa tavallisestikin. Muun muassa aukotuksia muutettiin tarpeeksi suurten yhtenäisten ulkoseinäpintojen aikaansaamiseksi, ja sisäänvedettyjen parvekkeiden ja liian suurten ulokkeiden alle lisättiin tarvittavia pilareita. Ongelmakohtiin etsittiin myös periaatteellisia ratkaisuja: miten rakenteelliset raja-arvot otetaan jatkossa jo luonnossuunnittelussa huomioon.

Talotekniikan osalta suurimmaksi haasteeksi osoittautui viemäröinti. Viemäreitä on helppoa vetää moduulin alapohjakennon ytimien suuntaisesti, mutta vastakkainen suunta on hankalampi. Esimerkkiasuntopohjia muutettiin niin, että märkätilat saatiin hormien kannalta optimaalisiin paikkoihin. Kennon ytimien kanssa vastakkaiseen suuntaan viemäriä voidaan vetää esimerkiksi seinä-malliseen wc-istuimeen liittyvässä kotelossa, joka kylpyhuoneen puolella toimii esimerkiksi hyllynä, tai lyhyempiä matkoja myös moduulin alapohjarakenteeseen kuuluvan poimulevyn syvennyksessä. Rakennukseen valittiin keskitetty ilmanvaihto, ja iv-putket saatiin kulkemaan käytävien alakatoissa toistensa kanssa risteämättä. Ilmanvaihdon osalta kennorakenteinen moduulikerrostalo ei suuresti eroa tavallisesta betonirakenteisesta talosta.



Katujulkisivut. Materiaaleina tiililankku ja värilliset rappaukset.

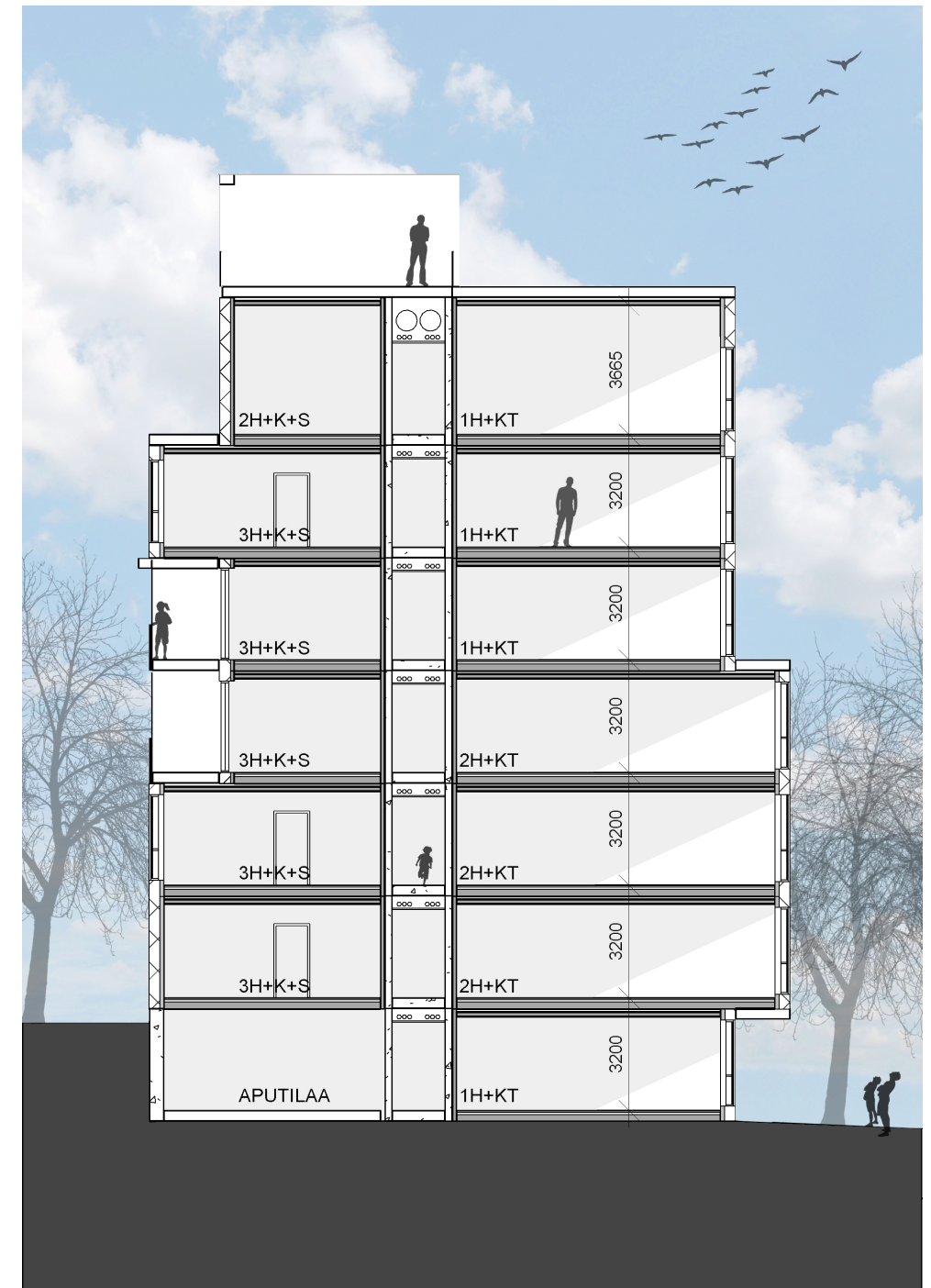


Hormit sijoitettiin porrashuoneen seinälinjalle, jolloin yksittäisen moduulin tekniikka voidaan rakentaa tehtaassa mahdollisimman valmiiksi, ja työmaalle jää ainoastaan tekniikan kytkeminen hormoneihin.

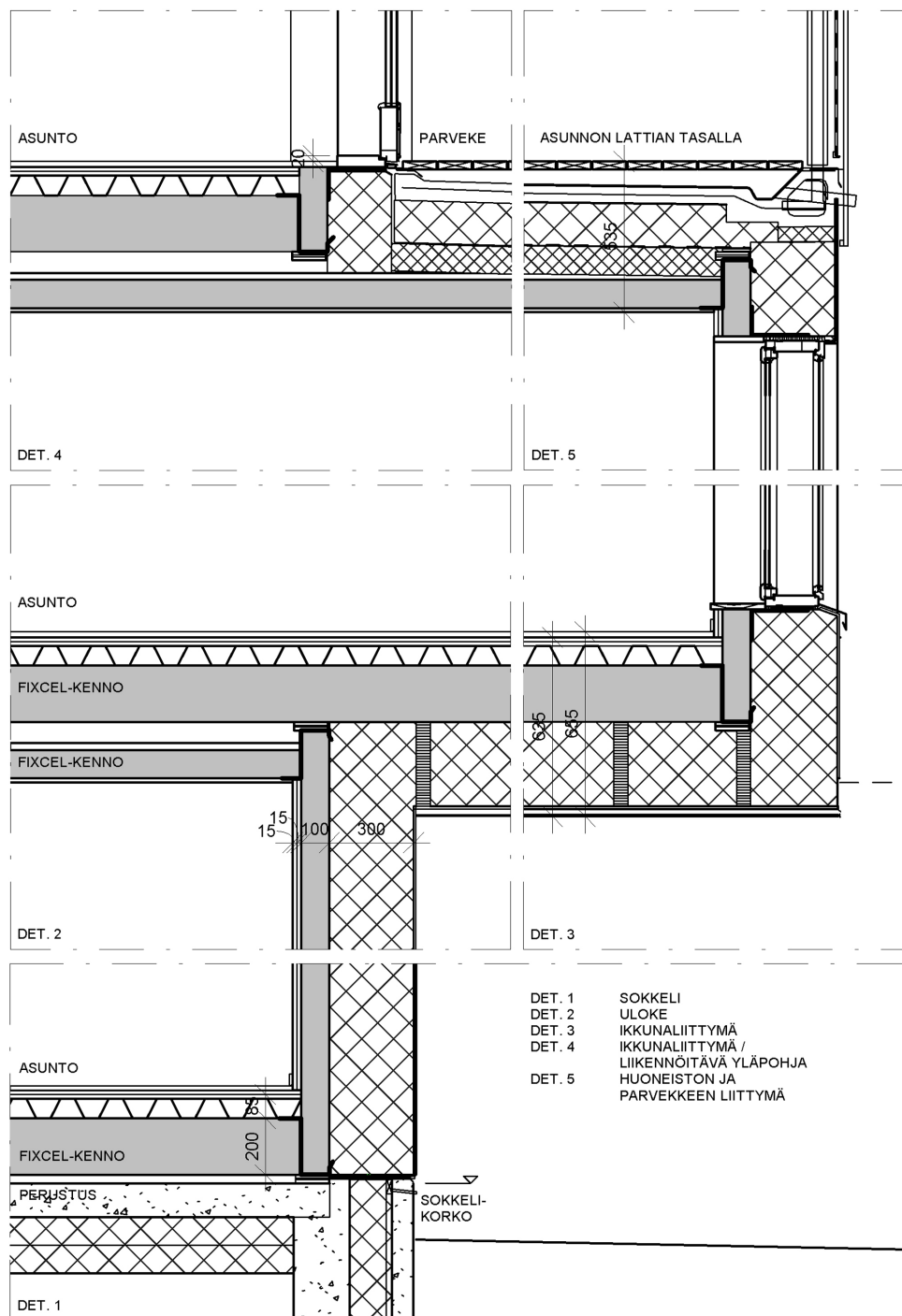
Koska teräskennorunkoisessa rakennuksessa lämpötilanvaihtelut ovat nopeampia kuin betonirunkoisessa talossa, auringonsuojaus rakenteellisesti on erityisen tärkeää. Hyvällä auringonsuojauksella voidaan vähentää koneellisen jäähdytyksen tarvetta ja säästää energiaa. Paras vaihtoehto on sellainen, joka suojaa myös kevät- ja syyspäivien matalalta paistavalta auringolta ja on ikkunan ulkopuolella, jolloin aurinko ei pääse lämmittämään huoneilmaa. Pimeää vuodenaikaa ajatellen on hyvä, jos auringonsuojat saa halutessaan kokonaan pois ikkunoiden edestä. Kuvissa on esitetty kolme vaihtoehtoa; auringonsuojaus avattavin säleiköin, siirrettävin säleiköin ja alasvedettävin ulkopuolisin kaihtimin. Vaihtoehdoilla voidaan antaa rakennukselle erilaista arkkitehtonista ilmettä; auringonsuojaus voi olla kiinteä osa julkisivua, ja sen avattavuus ja suljettavuus tuovat julkisivuun mielenkiintoista vaihtelua. Toisaalta esimerkiksi alasvedettävät auringonsuojat voivat auki ollessaan sulautua huomaamattomina julkisivuun.

Hanke valotti, miten modulaarinen rakentamistapa tulisi huomioida jo suunnittelun alkuvaiheessa esim. rakennusosien dimensioissa, aukoksissa ja ulokeissa sekä talotekniikan suunnittelussa. Teräskennorunko, kuten muutkin rakennevaihtoehdot omilla tavoillaan, asettaa arkkitehtuurille tiettyjä mitoituksellisia lähtökohtia, koska yhden moduulin leveys voi olla maksimissaan noin seitsemän metriä. Pituudeltaan moduuli voi olla myös suurempi. Esimerkiksi asutosuunnitteluun tämä mitoitus soveltuu hyvin, ja yhden asunnon saa luontevasti suunniteltua yhteen moduuliin. Asunto tai muu tila voi tuki koostua myös useammasta moduulista, jolloin myös esimerkiksi kaksikerroksiset ratkaisut ovat mahdollisia.

Uusi rakentamistapa mahdollistaa asioita, joita perinteisellä betoniteknikalla ei voi helposti tehdä. Tässä merkittävimpänä tekijänä on teräskennojen keveys, joka sallii perinteistä vapaamman massoitte-
 lun, kuten ulokkeet ja aukot rakennusmassassa. Tehdasvalmistus takaa rakentamisen korkean laadun sääolosuhteista huolimatta, ja työmaavaiheesta aiheutuva häiriö rakennetulle ympäristölle on modulaarisessa rakentamisessa hyvin pieni. Lyhyt työmaa-aika on suuri etu mm. lisä- ja täydennysrakentamiskohteissa ja tiiviissä kaupunkiympäristössä. Teräskennojen hiilijalanjälki on pieni, ja moduulitekniikalla saadaan aikaan energiatehokkaita ratkaisuja.



Leikkaus A-A



Auringonsuojaus avattavin säleiköin.



Auringonsuojaus siirrettävin säleiköin.



Auringonsuojaus ulkopuolisten alasvedettävien säleiden avulla.

6.2. VIRTUAALIHANKKEEN TALOTEKNIIKAN SUUNNITTELURATKAISUT

Janne Mäki, Suunnittelulinja Finland Oy

Tutkimusprojektin suunnitteluosiossa suunniteltiin virtuaalirakennuksen yhden siiven asuinkerrokset. Moduulirakentamisen suunnitteluratkaisuissa on otettu huomioon teräskennorakenteiden erikoispiirteiden lisäksi myös muuttuneiden rakentamismääräyksien vaikutuksia. Esitetyt suunnitteluratkaisut perustuvat tutkimusprojektissa suunniteltuun kuvitteelliseen rakennukseen, johon pyrittiin kokoaamaan moduulirakentamiselle mahdollisia ratkaisuja sekä hakemaan ja ratkaisemaan ongelmakohtia. Osa esille tulleista ongelmista tai haasteista vaatii lisätutkimista ja kehitystä, jotta tuotteesta tulisi valmis ja kilpailukykyinen sekä pystytään huomioimaan myös vaihdettavuusasiat. Esitetyt havainnot perustuvat tässä projektissa esille tulleisiin asioihin.

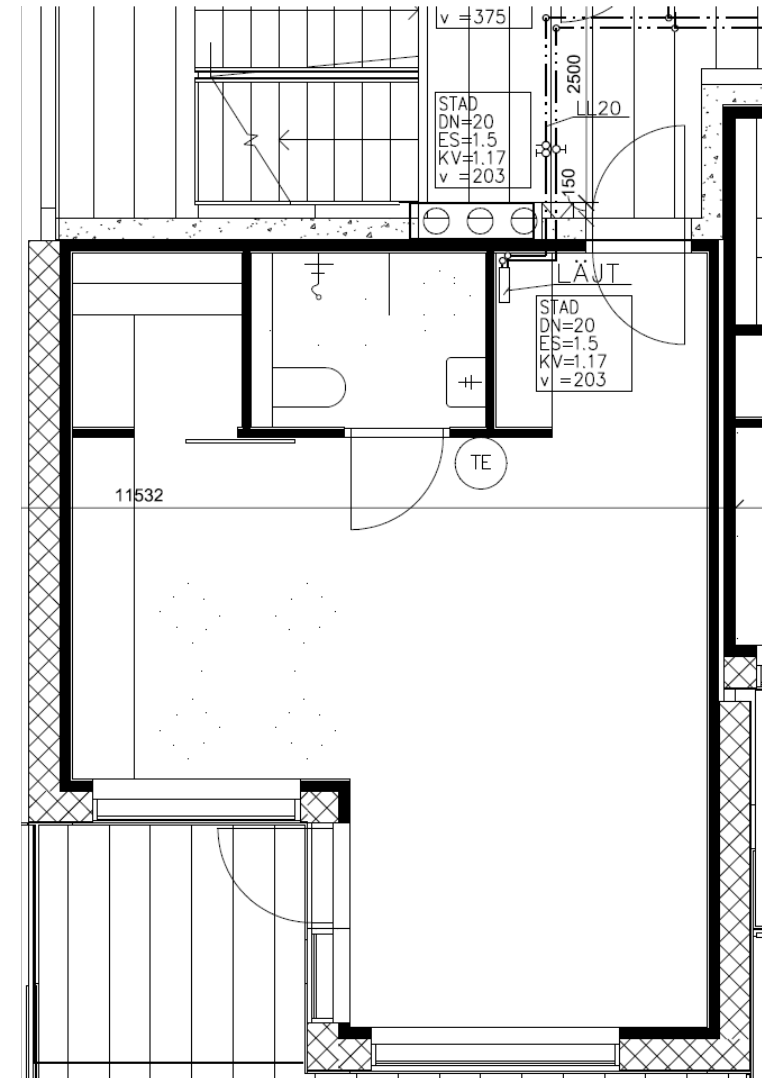
Tässä luvussa kuvataan, miten talotekniset suunnitteluratkaisut on virtuaalirakennukseen tehty. Luvussa esitetään vain normaaleja taloteknisiä ratkaisuja, eikä ole lähdetty kehittämään taloteknisesti kokonaan uusia ratkaisuja, tai tutkimaan harvinaisempia olemassa olevia ratkaisuja. Tavoitteena on saada moduulirakentamisesta taloudellisesti kilpailukykyistä. Ratkaisujen on siksi hyvä olla sellaisia, että niitä pystytään kilpailuttamaan mahdollisimman vapaasti eikä olla sidoksissa yhteen järjestelmätoimittajaan.

Pohjapiirustusten oikeudet omistaa Arkkitehtitoimisto Hedman&Matomäki Oy. LVIS-tekniikan piirustuksien oikeudet omistaa Suunnittelulinja Finland Oy.

6.2.1. Lämmitys

E-lukuvaatimus asuinkerrostalolle on Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 (2012) mukaan 130 kWh/m²,a. Uutena vaatimuksena (D3, 2012) asuntorakentamisessa on 150 astetunnin raja, jota kauemmin asunnon lämpötila ei saa ylittää 27 astetta. Vaatimus on kova ja vaatii joko koneellista jäähdytystä tai selkeitä auringonsuojaustoimia. Uusissa määräyksissä (D3 2012) myös asuinkerrostalon jäähdytyksen ja ilmanvaihdon sähkönkulutus täytyy mitata.

Asuntoihin on helppo saada pientä viilennystä, kun valitaan keskitetty ilmanvaihto. Näin säästytään ikkunan ulkopuolisilta varjostimilta; auringonsuojalasit ja sälekaihtimet riittävät. Myös sähkönkulutuksen mittaukset ja laitteiden huollot on helpompi toteuttaa, kun käytetään keskitettyä ilmanvaihtoa.



Malliasunnon lämpösuunnitelman pohja. Lattialämmityspiirejä ei ole esitetty.

Asuntojen lämmitykset tehdään vesikiertoisina. Kosteiden tilojen lämmitys on kannattavinta tehdä lattialämmityksellä ja siksi myös muun asunnon lämmitys on käytännöllistä tehdä samalla ratkaisulla. Näin vältetään toisen lämmityspiirin vaatimat toiset lämpölinjat. Lisäksi asuntokohtaiset lämpötehot ovat niin pieniä, että perinteisellä patterimitoituksella asuntokohtaisen lämmityssyötön linjasäätöventtiiliksi pitäisi valita käyttöveden linjasäätö tai muu erikoismalli. Normaaleille lämmityksen linjasäädöille ei saada pienillä virtaamilla riittävää mittauspaine-eroa. Kuivat tilat erotetaan märkätiloista magneettiventtiilillä, jolloin kesäkaudella voidaan sulkea kuivien tilojen lämmitys pois ja kosteisiin tiloihin jää käyttöön mukavuuslämpö. Tehokkaan aurinkosuojauksen takia auringon aiheuttamat julkisivukohdaiset lämpötilaerot ovat pienempiä, minkä vuoksi kohde toteutetaan lähtökohtaisesti yksillä lämpönousuilla. Myös perinteiset kerrostalot toteutetaan tyypillisesti samalla tavalla. Lattialämmityksen toimilaitteiden ja huonetermostaattien tulee olla portaattomasti toimivia.

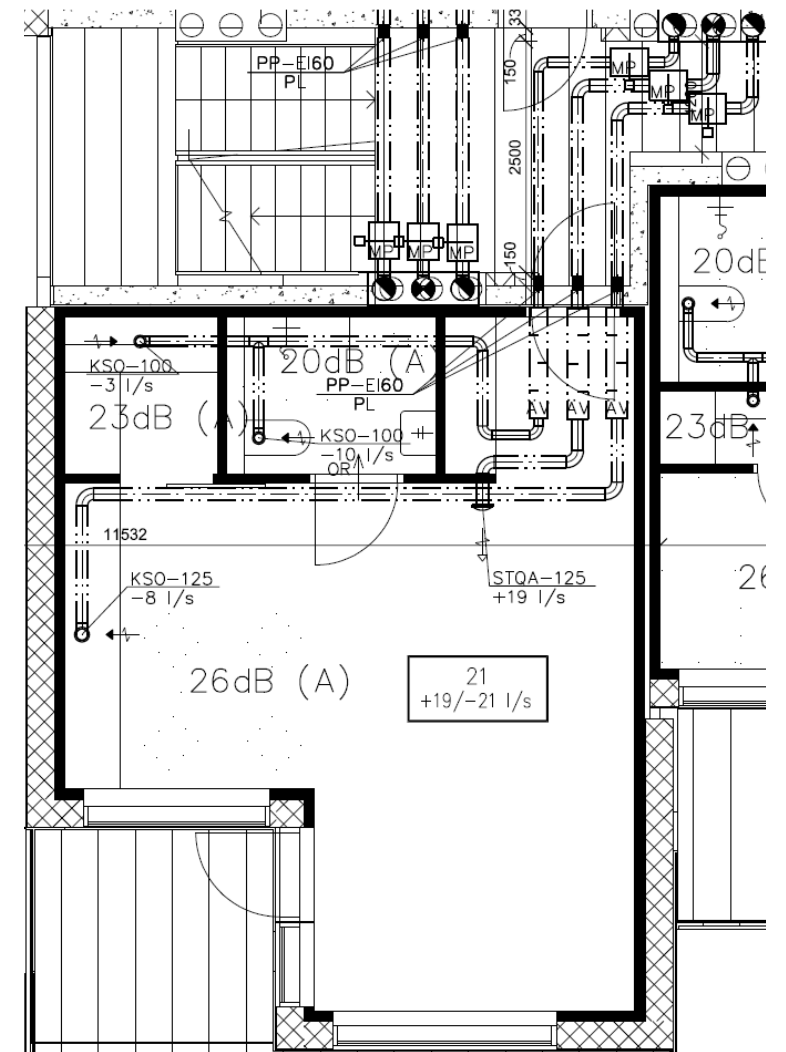
Moduuliratkaisu ei poikkea lämmitysratkaisun suhteen oleellisesti perinteisistä rakennustavoista. Lämmityslähteen valintaan ei vaikuta se, onko rakennus tehty modulaarisesti vai ei.

Asuntomoduurin lämmitysjärjestelmä voidaan rakentaa tehtaalla valmiiksi, mutta vesitäyttöä ei kannata tehdä, jos kuljetuksen tai varastoinnin aikana on jäätymisriski. Lämmityksen liitosrajana on moduurin ulkoseinässä oleva asennusaukko, johon liitytään porrashuoneen puolelta. Lämpörungot nousevat rappukäytävässä ja jakoputkisto on käytävän alakatossa. Asuntoihin mennään sisälle alakaton kohdalta palo- ja ääniasiat huomioiden. Asuntojen linjasäädöt ja sulut ovat käytävän puolella. Projektissa ei kiinnitetty suurta huomioita lämmönjakohuoneeseen eikä ilmanvaihtohuoneisiin, koska niiden toteutuksessa ei ole suurta eroa tavanomaiseen.

6.2.2. Ilmanvaihto

Energiamääräysten mukaan ilmanvaihdon lämmöntalteenotossa on päästävä korkea kokonaisvuosihiyötysuhteeseen. Siksi lämmöntalteenoton ohi ei kannata tehdä erillisiä poistoilmapuhaltimia. Asuntojen poistoilman epäpuhtauden takia tehokkaimmat regeneratiiviset ratkaisut eivät käy lämmöntalteenotoksi, vaan pitää valita nestevälitteisten patterien ja kennoratkaisujen väliltä. Ilmanvaihdon suunnittelua ohjaa rakentamismääräyskokoelman osa D2. Palo- ja savunrajoitusasioita on esitetty määräyskokoelman osissa E1 ja E7. Ilmanvaihtolaitteistojen paloturvallisuusopas 1.2012 antaa tarkennuksia E7:ään.

Kanavisto suunniteltiin kestävyuden ja paloturvallisuuden kannalta turvallisella, tyyppihyväksytyllä teräksisellä kierresaumakanavistolla. Päätelaitteiksi valittiin metalliset pääte-elimet, joille löytyy tyyppihyväksyntä savurajoittimiksi.



Malliasunnon ilmanvaihtoratkaisu. Äänilaskelman tulos näkyy kuvassa.

Ilmanvaihto suunniteltiin tarkoituksella hankalimmalla tavalla, missä keittiön liesipoistot on viety eri poistokanavana ilmanvaihtohuoneeseen asti. Tällä ratkaisulla asunnolle tulee kolme eri kanavaa porrashuoneen kautta. Porrashuoneen alakattoon sijoitettiin ilmamääräsäätimet. Asukas voi säätää ilmanvaihtoa tarpeen mukaan: liedelle saadaan ajastimen kautta tehostettu ilmanvaihto. Asunnon poistoilman lämpötila tehostaa ilmanvaihtoa automaattisesti, kun lämpötila ylittää asetetun rajan.

Porrashuoneen ja asunnon väliin tulee palopellit ja välittömästi asunnon puolelle äänenvaimentimet. Asuntomoduulien ilmanvaihto voidaan rakentaa täysin valmiiksi jo tehtaalla. Kanavisto ja venttiilit pystytään säätämään (tasapainottamaan) jo tehtaalla tilapaisten puhaltimien avulla. Lopullisessa kohteessa ilmamäärsäätimiin asetetaan ala- ja ylärajat. Ilmamääriä ohjataan portaattomasti niin, että tulo- ja poistoilmamäärän suhde säilyy.

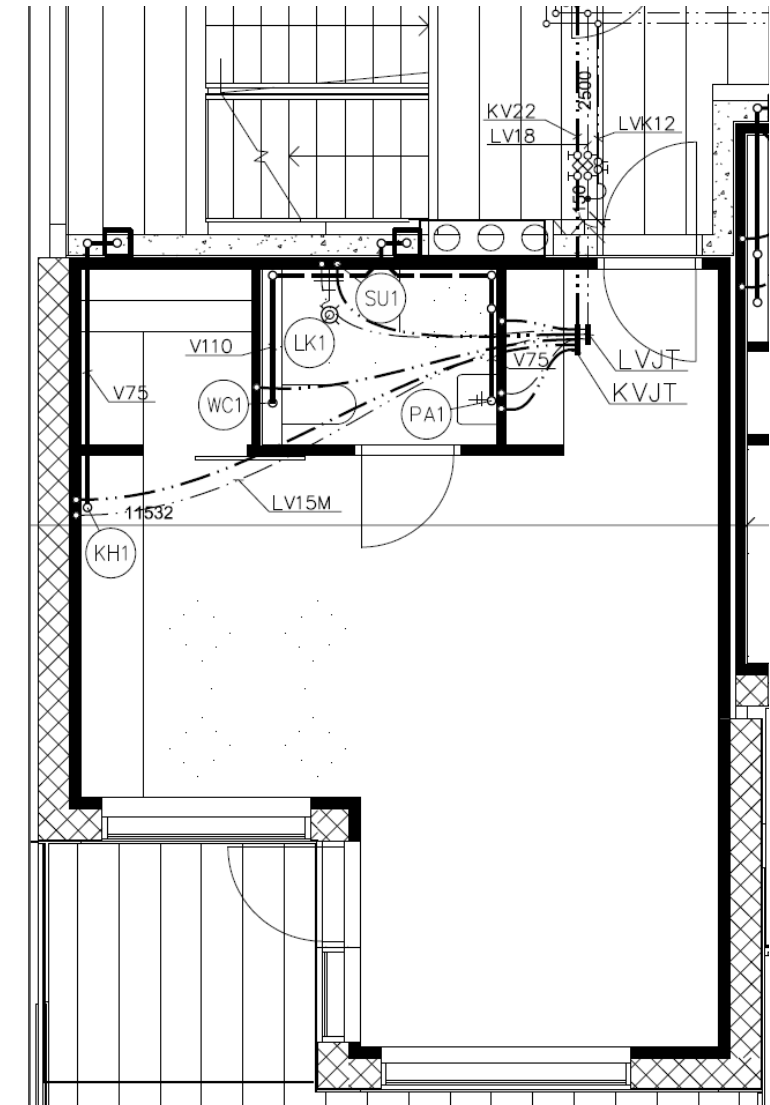
Teräskennorakenteisen modulaarisen rakennuksen ääni- ja lämpötilakäyttäytyminen on erilaista kuin perinteisissä betoni- tai puurakaisuissa. Käytävältä asuntoihin johtavien kanavien äänenvaimennus on otettava huomioon. Kennorakenteisen talon pieni ominaislämpökapasiteetti ja kosteuden sitomattomuus aiheuttavat jyrkempiä sisälämpötilamuutoksia lämpökuormien mukaan. Tämä on otettava huomioon siten, että ilmanvaihtoa voidaan tarvittaessa tehostaa ja tuuloilmaa viilentää.

6.2.3. Käyttövesi ja viemäri

Käyttöveden ja viemärijärjestelmän suunnittelua ohjaa rakentamismääräyskokoelman osa D1. Moduulirakentamisen haastavimmat LVI-asiat ovat viemäreiden liitokset ja kytkentäviemärien saaminen välipohjaan. Suunnittelun moduulirakenteen välipohjassa pystyy viemäreitä viemään vain teräskennon ytimien suuntaan. Kostean tilan pintalattiassa pystyy kallistukset huomioon ottaen viemään 32 mm viemäriä.

Viemärihormien liitoksien kytkeminen moduulista toiseen moduulin keskellä on osoittautunut käytännössä vaikeaksi. Toimenpide vaatii isot työaukot ja sen, että pystyviemäriinjat tehdään paikan päällä vasta moduulien asennuksen jälkeen. Tästä syystä sovittiin, että moduulien lvi-liitokset tulevat seinän kautta porrashuoneeseen ja pystysuuntaisia liitokohtia moduulin alueella vältetään.

Viemärit pyrittiin kokoamaan moduulissa yhteen, jolloin käytävälle tulisi liitoskohtia mahdollisimman vähän. Käytännössä viemäroitävien kalusteiden pitää olla linjassa samalla linjalla, ja lattiaelementin ytimien suunnan tulee olla käytävään päin. Jos kennot ovat porrashuoneen suuntaiset kuten pienissä asunnoissa, tulee viemäripisteiden olla porrashuoneen seinustalla. Viemäreitä on mahdollista kuljettaa lattian päällä kotelossa, mutta pohjaratkaisun pitää mahdollistaa kotelon viennin yhtenäisenä porrashuoneen seinälle asti.



Malliasunnon kvv-suunnitelma.

Tässä ratkaisussa seinälle asennettavat WC-istuimet ovat käytännöllisiä ja niitä on mahdollista asentaa useampia samalle linjalle. Kotelossa kulkevat viemärit tuodaan lattian päällä käytävälle ja kytetään runkolinjaan eri korkeudelta kuin kennon sisältä tulevat viemärit. Tämä on otettava huomioon porrashuoneen työaukoissa.

Ideaalitilanteessa märkätilojen lattia rakenne on n. 200–250 mm korkea tila, jossa viemäreitä pystytään viemään eri suuntiin – samaan tapaan kuin ontelolaattakerrostaloissa usein tehdään.

6.2.4. Sähkötekniikka

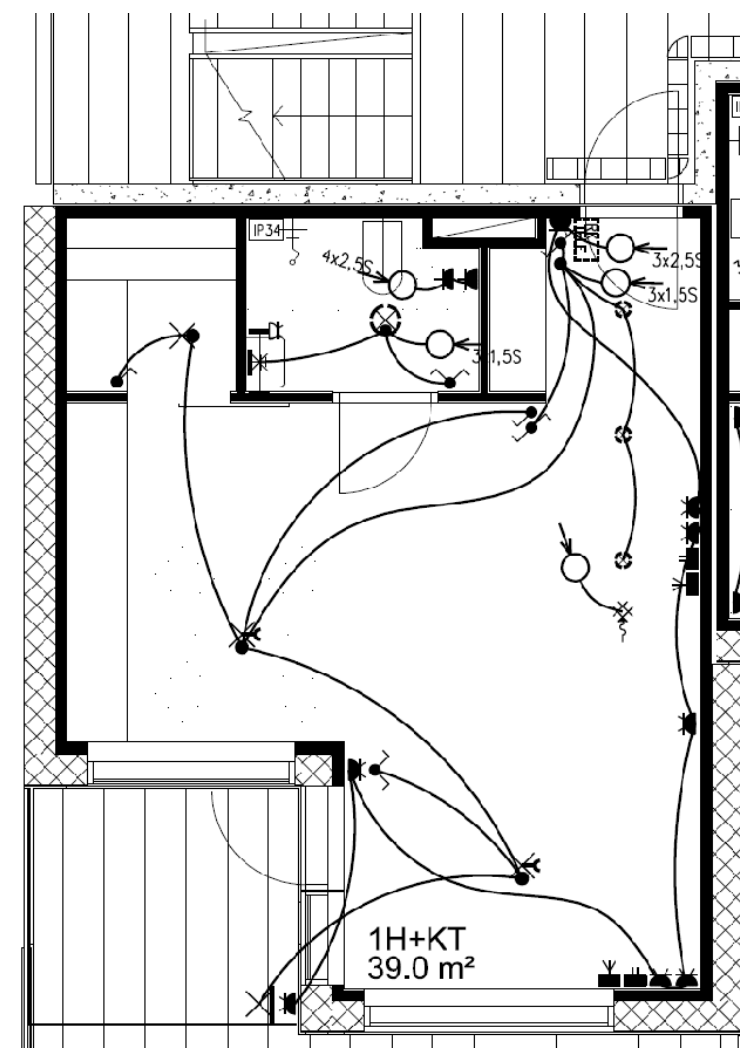
Modulaarinen teräskennorakenne tuo sähköasennuksiin uusia mahdollisuuksia. Johdotuksia pystyy viemään kennon sisällä sujuvasti. Asuntojen ryhmäkeskuksen syötöt kannattaa kytkeä vasta kun moduuli on asennettu, jotta vältetään ylimääräisiltä jatkoksilta ja liitoksilta. Kyseessä on siisti ja varsin nopea työvaihe. Eteisen alakatossa pitää olla tarkastusluukku ja moduulin porrashuoneen vastaisessa seinässä holkit johdotuksia varten.

Asuntojen ryhmäkeskukset asennetaan ulko-oven viereen, jolloin syöttökaapelit voidaan tuoda keskukseen yhtenäisinä ilman jatkoliitimiä. Ryhmäkeskuksissa on tele-osa, jonne liitetään yleiskaapeloinnin ja antenninjärjestelmän nousukaapelit.

Kaapelihyllyt sijoitetaan kapeissa porrashuoneissa seinälle ja seinän suuntaisesti, jolloin niihin on mahdollista päästä vielä myöhemmin käsiksi ja kaapelien lisäys on mahdollista. Rappukäytävän läpi kulkevien kaapeleiden tulee olla halogeenivapaita ja nippupolttokokeen kestäviä (standardi IEC/EN 60332-3), muuten kaapelit on koteloitava EI30 rakenteella.

Metallirakenteiset moduulit tulee yhdistää toisiinsa sähköisesti ja maadoittaa. Kaikkien suurten metallipintojen on oltava samassa potentiaalissa ja liitettynä päämaadoituskiskoon.

Asuntojen sähkömittarit ovat mittauskeskuksessa sähköpääkeskushuoneessa. Myös ilmanvaihdon ja jäähdytyksen sähkönkulutus mitataan; se toteutetaan takamittauksena pääkeskuksessa. Ilmanvaihtoon tulee IV-hätäseis-laukaisujärjestelmä, joka pysäyttää ilmanvaihdon pääsisäänkäynnin läheisyydessä olevasta painikkeesta.



Porraskäytävissä on sähkötoimiset savunpoistoluukut, joiden avauspainikkeet on sijoitettu pääsisäänkäynnin läheisyyteen. Savunpoistokeskus sijoitetaan pääkeskushuoneeseen. Palovaroittimet on kytketty asuntojen sähköverkkoon; niitä on oltava asunnossa vähintään yksi jokaisen kerroksen alkavaa 60 huoneneliötä kohden. Varoittimissa on oltava paristovarmennus. Jos asunnossa on useampi kuin yksi varoitin, ne tulee liittää toisiinsa.

6.2.5. Tele- ja heikkovirtatekniikka sekä kiinteistöautomaatio

Kaapeloinnit menevät samoja reittejä kuin vahvavirtasähköissä. Kohdetta voi pitää perinteistä betonirakentamista helpompana. Käytäntö on osoittanut, ettei teräskennorakenteisessa kerrostalossa ole matkapuhelimilla sen suurempia kuuluvuusongelmia kuin betonirakennuksissakaan. Suurimmat ongelmat kuuluvuudessa on betonirakenteisissa kellareissa.

Moduuleissa olevat heikkovirtajohdotukset asennetaan valmiiksi keskukseen, mutta porraskäytävästä tulevat nousujohdot jätetään lenkeille. Nousukaapelointina voidaan käyttää nippupolttokokeenkestävää hybridikaapelia, jossa on tarvittavat yleis- ja antennikaapelit samassa paketissa.

Kiinteistöautomaation osalta moduuliratkaisu ei suunnittelun osalta poikkea perinteisestä. Toteutuksen rajapintoja moduulitehtaalle ja kohteen automaatiourakoitsijalle on esim. moduuleihin asennettavien lämpötila-anturien asentaminen.

6.2.6. Suunnittelu

Kennorakenteisen moduulirakennuksen suunnittelutyö tulisi tehdä normaalia suunnittelusisältöä huomattavasti tarkemmin ja moduulikohtaisesti. Normaalin suunnittelun tehtäväluetteloiden mukaiset tehtäväsisällöt eivät ole riittäviä.

Ennen suunnitteluvaihetta pitää sopia tarkasti työnjako moduulitehtaan ja muun toteutusorganisaation välillä. Kokonaisuuden toiminnan kannalta on hyvä lukita kaikki kohteessa käytettävät ratkaisut, laitteet ja menetelmät keskenään yhteensopiviksi – myös ulkonäköasiat huomioiden. Laitteiden hankinnat voi sisällyttää moduulitehtaalle, jos ne on määritetty niin tarkasti, että saumaton toiminta kokonaisuuden kanssa on varmistettu.

Asennussuunnitelmissa pitää sovittaa yhteen rakenteet ja eri teknikat. Urakoitsijalle kuuluvien asennussuunnitelmien tarkastus täytyy suorittaa ennen toteutusta. Rakenteet ovat oleellinen osa tätä rakennustapaa; asennussuunnitelmissa rakennedetaljeilla on suuri rooli.

6.2.7. Toteutus

Moduulirakentaminen poikkeaa toteutustavaltaan melkoisesti perinteisestä paikalla rakentamisesta. Perinteisen rakentamisen kohteessa

on yksi kokonaisvastuullinen alan urakoitsija (mm. rakennus-, sähkö-, putki-, ilmanvaihto ja automaatiourakoitsija). Urakoitsijat vastaavat kukin oman urakkansa sisällöstä, tarkasta työn ja materiaalitoimitusten aikatauluttamisesta, työn suunnittelusta sekä eri urakoiden yhteensovittamisesta. Urakoitsijat tekevät tarvittavat asennussuunnitelmat itse ja huomioivat niissä valitut laitteet asennus- ja huolto-ohjeineen. Kaikki urakoitsijat antavat hankkimistaan sähkölaitteista tiedot sähköurakoitsijalle johdotussuunnitelmaa varten. Normaalisti työmaalla pidetään urakoitsijakokouksia, joissa urakoitsijat sopivat keskenään tarkasti asennusjärjestykset ja paikat niin, ettei asennuksilla estetä muiden urakoitsijoiden asennuksia.

Moduulirakentamisessa tehtaalla valmistetaan moduuleja, esim. muuttovalmiita asunomoduuleja. Ennen kokoonpanoa täytyy tehdä tarkat asennussuunnitelmat. Asennussuunnitelmat voivat kuulua moduulitehtaan toimitukseen tai tilaaja voi huolehtia niistä. Moduulitehtaan asentajat eivät ole välttämättä kerrostalo- tai asuinrakentamisen ammattilaisia. Moduulitehtaalla on moniosaajia, jotka tekevät tarkkojen suunnitelmien ja työnjohdon alaisuudessa erilaisia töitä. Asentajat vaativat huomattavasti normaaleja rakentamisen ammattilaisia yksityiskohtaisempia suunnitelmia.

Moduulirakentamisessa tulee perinteistä rakentamista enemmän urakoiden rajapintoja ja siksi siinä on tärkeämpää saattaa suunnitelmat ja urakkaohjelmat vastaamaan tarvetta. Urakkarajat pitää selostaa tarkasti, ja vastuiden pitää olla selvät niin suunnittelijoiden kuin urakoitsijoidenkin osalta.

Moduulirakentamisessa on mahdollista, että tehtaalla on eri sähkö- ja lvi-urakoitsija kuin työmaalla. Urakoiden ja vastuun yhteensovitus on tärkeää. Laadun varmistamiseksi ja urakkarajojen rajapintojen ongelmien vähentämiseksi pitää moduulin järjestelmät testata ennen kuin ne hyväksytään tehtaalla vastaanotettavaksi. Tehdas luovuttaa kaikki dokumentit – myös moduulien loppupiirustukset – ennen kuin tilaaja ottaa moduulit vastaan. Pitää tarkasti sopia, kuka vastaa moduuleista, kun ne siirretään tehtaalta ulos ja kuljetetaan asennuspaikalle.

Moduulirakentamisessa asennuspaikalle jää huomattavasti normaalia rakennustapaa vähemmän työtä, mikä ei välttämättä kiinnosta isompia ja kokeneempia urakoitsijoita. Urakoitsijoiksi voidaan valita pienempiä urakoitsijoita, jotka eivät välttämättä ole tottuneet tekemään itse asennussuunnitelmia tai kantamaan vastuuta eri urakoiden yhteensovittamisesta. Pienet urakoitsijat ovat tottuneet olemaan isompien alihankkijoina ja tekemään työt saamiensa ohjeiden mukaisesti.

6.2.8. Yhteenveto

Talotekniikkasuunnittelijan näkökulmasta, ja useampien erilaisen moduuliprojektien kokemuksella, moduulirakentamisessa täytyy käyttää suunnitteluvaiheeseen huomattavasti enemmän aikaa ja tunteja kuin perinteisissä ratkaisuissa.

Ensin pitää saada arkkitehtipohjat sellaisiksi, että kohteeseen saadaan hormit tarkoituksenmukaisiin paikkoihin ja pystytään putkittamaan pystyviemärit. Viemäripisteet suunnitellaan paikkoihin, joista etäisyys hormiin ei tule ongelmaksi. Porraskäytävän alakattoon tulee jättää riittävästi vapaata tilaa. Myös asunnon eteisen ja kosteiden tilojen kohdalle tarvitaan alakattoon tilaa niin, että kanavilla pystytään risteilemään ilman erikoisosia. Jos moduulit halutaan tehdä tehtaalla sisätiloiltaan täysin valmiiksi, ei asuntomoduellien sisälle laiteta pystysuuntaisia katon tai alapohjan läpäiseviä hormoneja. Kaikki talotekniikkaliitokset moduulista ulos tehdään seinästä käytävään.

Jo suunnittelun alkuvaiheessa suunnittelijoiden pitää tehdä yhteistyötä ja huomioida talotekniikan asettamat rajoitteet. Kun arkkitehtipohjat ovat kunnossa (myös IFC-malli) ja LVI:ssä sekä rakennepuolella on luonnosteluvaiheessa varmistettu pohjaratkaisujen toimivuus myös tekniikan kannalta, rakennesuunnittelija tekee oman työnsä ja tarkat rakennelikkaukset. Rakennesuunnittelusta talotekniikkapuolelle tulevat rajoitukset on tärkeää saada selville, esim. mahdolliset palkit, teräskennojen ytimien suunnat ja aukotukset. Viimeiseksi tehdään LVIS-suunnitelmat mallintamalla. Kaikki suunnitelmat liitetään samaan IFC-malliin. Kun malli on toimiva, tilaaja voi kilpailuttaa laitteet ja järjestelmät. Sen jälkeen kun laitteet on lukittu, voidaan jatkaa moduulikohtaisia asennussuunnitelmia tarvittavine leikkaus- ja detaljipiirustuksineen sekä tarkkoja selityksiä.

Urakkahankinta-asiakirjoihin tulee käyttää riittävästi aikaa, ettei urakkaraja tai urakan sisältö jää epäselväksi. Toteutus tulee aikatauluttaa tarkasti ja realistisesti niin, että urakoitsijat voivat sitoutua annettuun aikatauluun.

Moduulirakentaminen on toistaiseksi vaikeampaa kuin perinteinen, joten yhteistyötä kannattaa tehdä vain kokeneiden ja pätevien urakoitsijoiden kanssa. Lähtökohtaisesti urakoitsijalla itsellään pitää olla vaaditut työnohjohtopätevyudet.

Toteutuksen valvontaan tulee käyttää runsaasti aikaa – ainakin aluksi, kun yhteistyökumppanit ovat vieraita tai kokemattomampia – ja kirjata tarkasti valvonnan tulokset sekä mahdollisesti vaaditut toimenpiteet. Rakentamisessa saadaan suurta hyötyä, kun tekijät oppivat oikeat menetelmät ja tavanomaisesta poikkeavan rakennustavan.

Kun menetelmä saadaan toimimaan, FIXCEL-teräskennoteknologiaa hyödyntävä moduulirakentaminen mahdollistaa uudenlaista ja laadukkaampaa rakentamista, joka on myös helpommin muokattavissa ja hyödynnettävissä rakennuksen elinkaaren päässä.

7. ESIMERKKI-KOhteita

Hanna Mielismäki, NEAPO Oy

7.1. Johdanto

FIXCEL®-teräskennon idea on lähtöisin halusta keksiä kustannustehokas ja korroosiokestävä ratkaisu teräskennon tuottamiseen. Lähtökohtana pidettiin, että kennon pitää olla kuumasinkittyä terästä, joka on korroosiokestävä perusraaka-aine rakennusteollisuudelle. Useiden kennovariaatioiden ja liittämistapojen jälkeen löydettiin kennolevyn valmistusmenetelmä kennosolu kerrallaan, minkä mahdollisti yksinkertainen liittäminen valssaamalla. Solumuoto rikottiin I-profiileiksi, jotka tehtiin rullamuovaamalla ja liitettiin toisiinsa valssausmenetelmällä. Syntynyt liitosmenetelmä on alettu kutsua kolmikerrosvalssaukseksi (triple seam rolling).

Kenno rakennetaan kolmesta 0,7–1,2 mm:n paksuisesta metallinauhasta, jotka liitetään toisiinsa pelkästään valssattujen taitosten avulla. Kokoaminen vertautuu konesaumattun peltikaton rakentamiseen eikä edellytä esimerkiksi hitsauksia. Tämän takia materiaalina voidaan käyttää ruostumatonta terästä paljon halvempaa kuumasinkittyä terästä. Koska saumaaminen ei riko sinkitystä, ei valmista kennoa tarvitse pinnoittaa tai suojata valmistuksen jälkeen ylimääräisillä käsittelyillä.

FIXCEL-teräskennolle ja sen sovelluksille on myönnetty useita patentteja sekä Suomessa että kansainvälisellä tasolla. Keveyden ja lujan rakenteensa ansiosta teräskennorakenne tarjoaa uudenlaisia avauksia rakennuskulttuurissamme, mm. asuntomoduulien laadukkaan sarjavalmistuksen hallituissa tehdasolosuhteissa. Teknologian avulla kyetään rakentamaan hyvinkin vaativille tonteille.



7.2. Case: Teräskennorunkoinen modulaarinen kerrostalo

7.2.1. Modulaarinen rakentaminen FIXCEL-teräskennolla

Moduulirakentaminen on luonnollinen jatko teollisen rakentamisen evoluutiossa. Suurin osa nykyisistä työmaista on esivalmistettujen rakennusosien kuten betonielementtien ja taloteknisten laitteiden yhteen liittämistä. Modulaarinen rakentaminen on kehittynyt esivalmistettujen elementtien kokoamista pidemmälle.

FIXCEL-teräskennorakenteet ovat yksi lupaavimmista rakenteista modulaarisen rakentamisen edelleen kehittymiselle. Kennorakenteilla päästään suurempiin moduulikokoihin ja jäykempään rakenteeseen kuin puu- tai teräshekillä. Esivalmistettu moduuli käsittää miehitettynä yleensä koko asunnon. FIXCEL-teräskennon mahdollistaa teollisen rakentamisen hyödyntämisen optimaalisella tavalla mittatarkan ja pitkälle viedyn esivalmistuksen ansiosta. Tämä myös varmistaa hankkeen pysymisen aikataulussa.

Juuri lujan mutta samalla kevyen teräskennon ansiosta suurmoduulit ovat helposti siirrettäviä, ja näin kerrostalojen ja tornirakenteiden rakentaminen voidaan siirtää kokonaan tehdasolosuhteisiin. Hyvä kuormankantokyky mahdollistaa monikerrosrakennusten rakentamisen pääosin ilman erillisiä pilari- tai palkkirakenteita. Rakennusten perustukset ja maanalaiset osat voidaan tehdä teräsbetonista.

Ohutlevykennossa yhdistyvät kevyen kennorakenteen ja kuumasinkityn teräksen edut: lujuus, jäykkyys, keveys, kantavuus, kierrätettävyys, paloturvallisuus, homehtumattomuus, tiiviys, korroosiokestävyys ja maanjäristyskestävyys.

7.2.2. Viisikerroksinen modulaarinen asuinkerrostalo

Vuonna 2012 valmistui viisikerroksinen modulaarinen kerrostalo Helsingin Myllypuron kaupunginosaan. Talon runkomateriaalina käytettiin FIXCEL-teräskennoa. Kellarikerros ja osittain maanalainen autohalli tehtiin perinteisesti betonista. Samaan aikaan, kun työmaa edistyi, valmistettiin asunnot sekä hissi- ja porrastornit moduulitehtaalla. Taloon ei tarvittu erillistä kantavaa runkorakennetta, koska moduulit ovat itsekkäviä.

Huoneistot viimeisteltiin keittiöitä, kodinkoneita ja laatoitusta myöten tasaisen lämpimissä tehdasolosuhteissa. Myös talotekniikka eli ilmanvaihto-, putki-, viemärinti- ja sähkötyöt tehtiin tehtaalla.



Jokainen asunto toimitettiin työmaalle muuttovalmiina, kokonaisten huoneistojen suuruisina suurmoduuleina. Moduulit koottiin tontilla kerrostaloksi liittämällä moduulit toisiinsa ja kytkemällä talotekniikka yhteen. Tässä kohteessa rappaus ja vesikatto tehtiin tontilla, mutta ne voidaan myös tehdä jo moduulitehtaalla.

7.2.3. Runkorakenne

Kerrostalon kantava runko on 0,7–1,2 mm vahvasta sinkitystä teräs-ohutlevystä muotoon valmistettua kennorakennetta. Teräskennolevyn ulkopuolelle tulee 30 cm:n kerros eristettä sekä eristerappaus. Lisäksi elementin sisäpuolelle asennetaan normaalisti kipsilevy.

Hyvä askel- ja runkoäänieristys perustuu kaksoisrunkorakenteeseen. Myös hyvä ilmaäänieristyskyky perustuu kaksoisrakenteeseen. Moduulien välissä on lisäksi elastinen eristemateriaali, joka vaimentaa askel- ja runkoääntä.

Muuta tietoa kohteesta

Osoite: Kivensilmänkuja 6, Helsinki

38 huoneistoa;

8 kpl 1h+k+s, 20 kpl 2h+k+s, 10 kpl 3h+k+s

Asuntojen koot:

1h+k+s: 38,5 m²

2h+k+s: 50–57,5 m²

3h+k+s: 73 m²

Moduulit ovat kokonaisen asunnon kokoisia eli yksi moduuli on yksi asunto.

3h+k+s moduuli painaa noin 28 tonnia.

Kerrosala: 2519 m²

Huoneistoala: 2118 m²

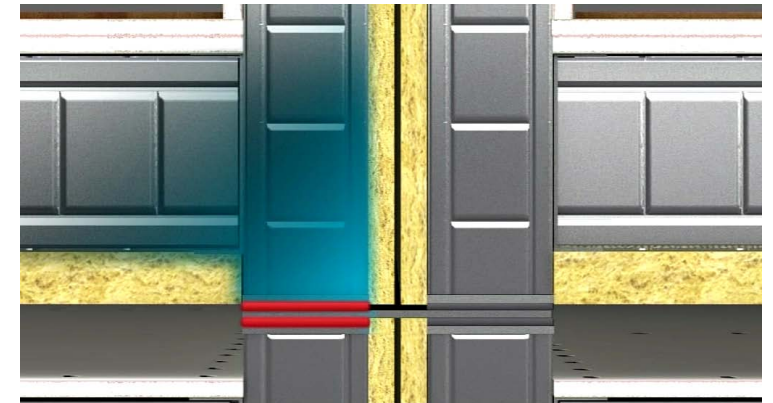
Tilavuus:

lämmi: 10837 m³

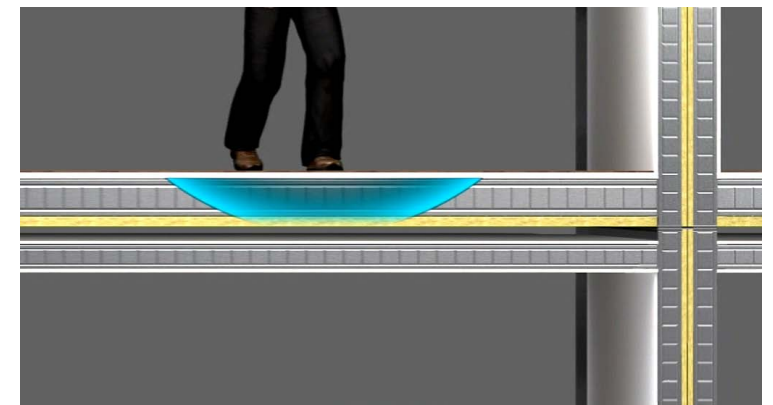
kylmä: 3810 m³

Paloluokka P1

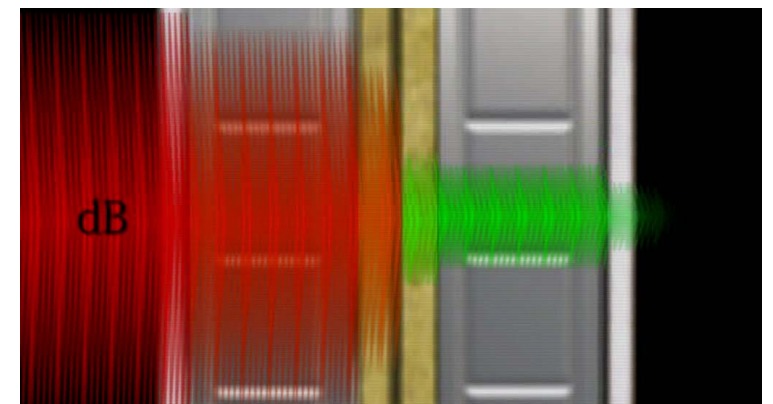
A-energialuokka



Moduulien välissä on elastinen värinäneriste



Askel- ja runkoäänieristys perustuu kaksoisrunkorakenteeseen



Ilmaäänieristyskyky perustuu kaksoisrakenteeseen

7.3. Case: Siirrettävä kerrostalo

7.3.1. Sisätiloissa rakennettu kerrostalo

FIXCEL-teknologia sopii esimerkiksi meren rannalle rakennettaviin rakennushankkeisiin, joissa maantiekuljetukset ovat leveyden takia esteenä. Kesällä 2011 valmistunut kolmikerroksinen toimistorakennus rakennettiin sisätiloissa Turun telakalla yhtenä kappaleena. Rakennus on suunniteltu ja toteutettu siten, että se voidaan irrottaa kunnallistekniikasta, nostaa perustusten päältä ja kuljettaa lavettien avulla pois tontilta uuteen paikkaan.

7.3.2. Itsekantava rakenne

Teräskennoelementtien kokoonpano aloitettiin telakkahallissa joulukuussa 2010. Ensimmäisessä koontivaiheessa tehtiin teräspäerustus. Runko koottiin kolmesta suuresta lohokosta hallin lattiatasolla. Runkolohkot asetettiin teräspäerustuksen päälle hallinostureiden avulla.

Kennorunkorakenne kantaa sekä itsensä että koko rakennuksen, joten erillistä runkorakennetta ei tarvittu. Taloon tehtiin hallitiloissa valmiiksi myös LVIS-putkitukset, asennettiin valaisimet ja laatoitettiin märkätilat. Runko verhoiltiin ja sisä- ja ulkopinnat viimeisteltiin.

7.3.3. Jäykkä rakenne kestää kuljetuksen

Rakennuksen merikuljetuksen suoritti ponttonialus, johon talo siirrettiin motorisoitujen lavettien avulla. Noin kolmen tunnin merimatkan jälkeen talo laskettiin tontilla laveteilta hydraulisesti teräsbetonipaalujen päälle ja kytkettiin kunnallistekniikkaan.

Muuta tietoa kohteesta

Osoite: Kutterintie 5, Turku

Rakennusaika: joulukuu 2010 - kesäkuu 2011.

Kokonaisala: 864 m²

Tilavuus: 3200 m³

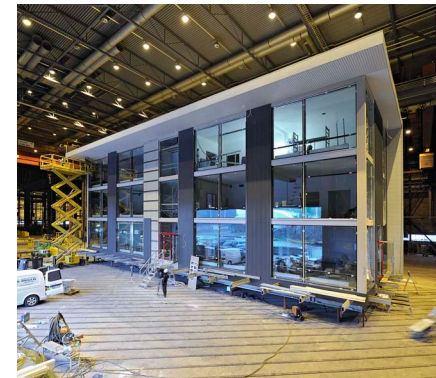
Rakennuksen mitat:

pituus n. 33 m

leveys n. 12 m

korkeus n. 12 m

Paino n. 220 tonnia + teräspalkkipäerustus



Talo valmistettiin kokonaisuudessaan sisätiloissa telakkahallissa.
Kuvaaja: Jouni Saaristo



Talo rullattiin motorisoitujen lavettien päällä ulos hallista ja siirrettiin ponttonialukselle.
Kuvaaja: Jouni Saaristo



Talon merimatka kesti kolme tuntia. Kuvaaja: Jouni Saaristo

7.4. Case: Tehdasvalmis hissitorni

FIXCEL-tekniikan yksi sovellus on tehdasvalmisteinen hissitorni, joka asennetaan taloon yhtenä kappaleena. Työmaa-aika lyhenee radikaalisti, kun mahdollisimman suuri osa työstä siirtyy työmaalta tehtaalle.

Hissitornin runko koostuu teräskennoelementeistä. Tornin sisäpin-
nalle tulee kipsilevy, joka maalataan. Tornissa on tehtaalta lähties-
sään viimeistellyt sisä- ja ulkopinnat sekä valmiit sähköistykset.

Kohdetyöt rajoittuvat vähäisiin purkutöihin ja perustuksen tekoon
sekä paikalleen asennetun tornin liitostöihin. Taloyhtiön hissityshan-
ke voidaan toteuttaa nopeimmillaan muutamassa viikossa.

7.4.1. Hissikoneiston asennus tehtaalla

Luja teräskennorakenne mahdollistaa sen, että hissikuiluihin voidaan
asentaa jo tehtaalla myös hissikori ja -koneisto. Menetelmä on uusi,
koska hissit asennetaan yleensä vasta kohteessaan, jo valmiiksi
asennetun hissikuilun sisälle pystysuoraan. Tämä on suuri edistys-
askel myös työturvallisuudelle, esimerkiksi putoamisvaaran, putoa-
vien esineiden ja paloturvallisuuden kannalta. Hissiasentajien ei tar-
vitse kiivetä pystysuorassa hissikuilussa, kun työskentely tapahtuu
hissikuilun ollessa tehtaalla vaakatasossa.



Hissikiskon asennus hissikuiluun vaakatasossa tehtaalla lattialla



Teräskennorungon sisäpuolelle tulee kipsilevy



EPS-eriste kuilun ulkopuolella

Helsingin Itäkeskuksessa sijaitsevaan kolmeen taloon asennettiin yhteensä kolme hissitornia yhdessä päivässä. Tehdasvalmiit tornit kuljetettiin kohteeseensa yhtenä tilaelementtinä, siirrettiin autonosturilla talon kylkeen ja kiinnitettiin talon runkoon kiinni. Hissikoneistot ja -korit oli asennettu valmiiksi jo tehtaalla. Hissit olivat käyttövalmiina hissitornin asennusta seuraavalla viikolla ja asukkaiden käytössä virallisen hissitarkastuksen jälkeen.

Muuta tietoa kohteesta

Osoite: Lehdokkipolku 5, Helsinki

Neljäkerroksiset kerrostalot; rakennusvuosi 1985

Hissihankkeen toteutus vuonna 2009

Hissitornin korkeus n. 12 m, leveys n. 2 m

Hissitornin paino hissiasennuksineen n. 6,5 tonnia

Kerrosala 48 m²

Tilavuus 150 m³

NEAPON FIXCEL-teräskennoteknologialla toteutetuista rakennuskoh-teista ja itse teknologiasta saa lisätietoa osoitteessa www.neapo.com



Hissitornin tuleva paikka olemassa olevan porraskäytävän ulkoseinällä, johon on tehty aukot porrastasanteiden kohdalle. Torni nostetaan betoniperustuksen päälle.



Hissitorni nostetaan pystyyn autonosturilla



8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kalle Kähkönen, TTY

Concells-tutkimushankkeessa on tartuttu kiinni mittavaan haasteeseen: uuden rakennejärjestelmän kehittämiseen ja kaupalliseen hyödyntämiseen. Tämä rakennejärjestelmä on kantava teräskennomoduuli. Rakennustoiminnan kohteeksi on valikoitunut asuinrakentaminen, johon liittyvät moninaiset laatu- ja toimivuusvaatimukset. Tämä tekee uuden rakennejärjestelmän kehittämisestä erityisen haasteellista.

Uuden rakennejärjestelmän saaminen kaupallisesti hyödynnettävään vaiheeseen edellyttää monia asioita. Ensinnäkin rakennejärjestelmän toiminnasta tulee olla tutkimustietoa. Tämän tulee koskea edustavalla tavalla kooltaan, laajuudeltaan ja ominaisuuksiltaan niitä rakenteita, joita käytännössä lähdetään suunnittelemaan ja toteuttamaan. Tutkimustietoon perustuen tulee olla olemassa suunnitteluohjeita tai jopa standardeja vähintäänkin kotimaisiin tarpeisiin. Koulutuksen ja käytännön kokemusten kautta tulee vähitellen kehittää liiketoiminnan ekosysteemi, josta löytyy osajia ja osajien koulutusta, sekä toimijoita ja palveluiden tuottajia erilaisten hankkeiden tarpeisiin.

Täysin uusi rakennejärjestelmä on teknisesti erittäin haasteellinen, mutta tarjoaa mielenkiintoisia uusia mahdollisuuksia. Näitä mahdollisuuksia on käsitelty Concells-hankkeen arkkitehtuurityöpaketissa, jossa on luotu sellaisia arkkitehtonisia ratkaisuja, joissa kennorakentamisen erityispiirteet ja uudet mahdollisuudet saadaan laajamittaisesti käyttöön. Näistä voi syntyä kilpailuetuja, kun ne vain oikealla tavalla onnistutaan hyödyntämään.

Tutkimuksen painopistealueena on ollut teräskennon rakenteellinen toiminta. Tarvittavia suunnitteluohjeita tai -normeja ei ole aiemmin ollut olemassa. Käytännössä on hankekohtaisesti jouduttu tekemään testauslaboratoriossa rakennekokeita, joiden perusteella kohteet on pystytty suunnittelemaan ja joiden pohjalta viranomaiset ovat voineet suunnitelmahyväksyä. Concells-hankkeessa

tehtiin joukko täyden mittakaavan rakennekokeita teräskenkoilla. Nämä kokeet ja niiden tulokset ovat ainutlaatuisia. Ne ovat arvokasta tietoaaineistoa sekä teollisuudelle että tutkimusyhteisölle.

Modulaaristen teräskentöjen valmistaminen ja lopullisten talojen rakentaminen vaativat erikoisosaamista ja näiden palveluiden tarjoajia. Perinteistä rakennustyötä näyttää kuuluvan näihin hankkeisiin vielä merkittävä määrä, mutta joka tapauksessa suurmoduulien valmistus ja asennukset tahdittavat koko hanketta. Tämän kokonaisuuden hallintaa sekä sen osaamisen ja toimijaverkoston kehittäminen ovat alueita, jotka vaativat erityishuomiota vielä pitkään.

Teräskentto jää käytännössä asuintalon asukkailta piiloon. Kuitenkin se on lähtökohtana ja ympäristönä monille talon ja asunnon ominaisuuksille ja käytettävyydelle. Näitä ovat mm. akustiikka, lämpötila, energiatehokkuus ja ympäristöasiat. Concells-hankkeessa on mahdollisimman laaja-alaisesti tarkasteltu myös näitä näkökohtia.

Kokonaistavoitteen kaltaisen ekosysteemin kehittäminen ja aikaansaaminen on pitkän aikavälin haaste. Yhdessä tutkimushankkeessa ei läheskään kaikkia tämän edellyttämiä ratkaisuja pystytä saamaan aikaiseksi, mutta joka tapauksessa runsaasti uutta tietoa ja ymmärrystä onnistuttiin saamaan lopputuloksena.

1. JOHDANTO

Blismas, Nick & Wakefield, Ron. 2007. Drivers Constraints and the Future of Off-Site Manufacture in Australia, Construction Innovation, Special Edition 2008.

Bock, T.; Georgoulas, C. & Linner, T. (Toim.). 2012. Advanced Construction and Building Technology for Society. Proceedings of the CIBW119 CIC 2012 Workshop. International Council for Research and Innovation in Building and Construction. 99 s.

Boyd, Neville & Khalfan Malik M. A.; Maqsood, Tayyab. 2012. Off-Site Construction of Apartment Buildings: a Case Study, Journal of Architectural Engineering, Australia.

Gorgolewski, M. T; Grubb, P. J & Lawson, R. M. 2001. Modular Construction using Light Steel Framing – Design of Residential Buildings, The Steel Construction Institute, SCI Publication P302 , 97 s.

Hartley, Andrew & Blagden, Alex. 2007. Current Practices and Future Potential in Modern Methods of Construction, AMA Research Ltd ,WAS003-001: Full Final Report.

Johnson, William. 2007. Lessons from Japan: A Comparative Study of the Market Drivers for Prefabrication in Japanese and UK Private Housing Development. Master's Thesis. University College London.

Jokimäki, Sanna. 2009. Näkökulmia tilaelementtiarkkitehtuuriin, sovelluksena koulu, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto

Lawson, R.M. & Ogden, R.G. 2010. Sustainability and Process Benefits of Modular Construction, TG57 - Special Track 18th CIB World Building Congress, May 2010 Salford, United Kingdom, CIB TG57 - Industrialisation in Construction, CIB Publication 354. 38-51

Modular Building Institute. 2012. Permanent Modular Construction - Annual Report 2012, Changing the way the World Builds

National Audit Office. 2005. Using Modern Methods of Construction to Build Homes More Quickly and Efficiently. National Audit office, UK. 29 s.

National Research Council. 2009. Advancing the Competitiveness and Efficiency of the U.S. Construction Industry, The National Academies Press, Washington D.C.

Pan, Wei & Goodier, Chris. 2012. House-Building Business Models and Off-Site Construction Take-Up, Journal of Architectural Engineering

Quale, J., Eckelman, M. J., Williams, K. W., Sloditskie, G. & Zimmerman, J. B. 2012. Construction Matters. Journal of Industrial Ecology. Vol. 16. No 2. 243–253.

2. ARKKITEHTUURI

Boyd, Neville; Khalfan Malik; Maqsood, Tayyab 2012. Off-site construction of apartment buildings: a case study. Journal of Architectural Engineering. Australia.

Hasu, Eija 2009. Koti pihalla. Kodin ulkotilat yksityisestä julkiseen. Asukkaiden kokemuksia asumisesta ja asumisen laadusta. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu. Arkkitehtuurin laitos. Yhdyskunta- ja kaupunkisuunnittelu. Espoo.

Haukkala, Teresa (toim.) 2011. Monipaikkaisuus – ilmiö ja tulevaisuus. Sitran selvityksiä 54. Sitra. Helsinki. ISBN 978-951-563-770-3 (nid.) ISBN 978-951-563-771-0 (PDF).

Ilmonen, Mervi 2007. Vetovoimainen kerrostalo. Teoksessa Arkkitehdit NRT Oy 2007. Kerrostalojen kehittäminen, talotyypiselvitys. Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston julkaisuja 2007:10. Kaupunkisuunnitteluvirasto. Helsinki. ISBN 978-952-473-950-4 (nid.) ISBN 978-952-473-951-1 (PDF).

Ilonen, Pia; Lukander, Minna; Niska, Ari / Arkkitehtuuri- ja muotoilutoimisto Talli Oy 2006. Helsingin kerrostaloatlas 2006. Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston yleissuunnitteluosaston selvityksiä 2006/6. Helsinki.

Juntto, Anneli 2008. Asumisen muutos ja tulevaisuus. Rakennetarkastelu. Erilaistuva asuminen, osaprojekti I. Suomen ympäristö 33/2008, Asuminen. Ympäristöministeriö. Helsinki. ISSN 1458-9664.

Kotilainen, Sini 2013. Ratkaisuja modulaarisen rakentamisen asuntosuunnitteluun. Julkaisu 7. Tampereen teknillinen yliopisto. Arkkitehtuurin laitos. Asuntosuunnittelu. Tampere. ISBN 978-952-15-3009-8 (painettu) ISBN 978-952-15-3010-4 (PDF).

Kukko, Heikki 2006. Asuntokuntien koon kehitys Suomessa, suurperheistä yksinasujiksi. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen työpapereita n:o 82. Helsinki. ISBN 952-5594-18-1 (nid.) ISBN 952-5594-19-X (PDF).

Lahti, Pekka; Heinonen, Sirkka; Halonen, Minna; Sinivuori, Paula (toim.) 2007. Monimuotoistuva asuminen – ennakoivia asiantuntijanäkemyksiä ja arvioiteja. VTT ja Ympäristöministeriö. Helsinki.

McGraw-Hill Construction 2011. Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry. Design and Construction Intelligence SmartMarket Report. McGraw-Hill Construction Research & Analytics. Yhdysvallat.

Nätkin, Ritva 2003. Moninaiset perhemuodot ja lapsen hyvä. Teoksessa: Forsberg; Hannele, Nätkin; Ritva (toim.): Perhe murroksessa. Kriittisen perhetutkimuksen jäljillä. Gaudeamus. Helsinki.

Prezza, Miretta; Schruijer Sandra 2001. The Modern City as a Community. Journal of Community & Applied Social Psychology. Volume 11 Issue 6, 11/12 2001. 401-494.

Ruotsalainen, Pekka 2011. Jäävätkö tuloerot pysyvästi suuriksi? Tilastokeskuksen Hyvinvointikatsaus 1/2011. 9-15. Tilastokeskus.

Ruutikainen, Tiia 2013. Kennosta kodiksi. Tutkielmia moduulirakenteisista asuinkerrostaloista. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Arkkitehtuurin koulutusohjelma. Tampere. ISBN 978-952-15-3018-0 (nid.) ISBN 978-952-15-3019-7 (PDF).

Suomen virallinen tilasto (SVT): Asunnot ja asuinolot 2010. ISSN=1798-6745. yleiskatsaus 2010, 1. Asuntokanta 2010 . Tilastokeskus. Helsinki. [Viitattu: 20.1.2013]. Saatavilla:<http://tilastokeskus.fi/til/asas/2010/01/asas_2010_01_2011-10-20_kat_001_fi.html>.

Suomen virallinen tilasto (SVT): Asunnot ja asuinolot 2011. ISSN=1798-6745. 2011. Tilastokeskus Helsinki. [Viitattu: 20.1.2013]. Saatavilla:<http://tilastokeskus.fi/til/asas/2011/asas_2011_2012-05-22_tie_001_fi.html>.

Tiuri, Ulpu 1997. Asunnon muunneltavuus ja avoin rakentaminen. Teknillisen korkeakoulun arkkitehtiosaston tutkimuksia 1997/12. Lisensiaatintyö. Teknillinen Korkeakoulu. Arkkitehtuurin laitos. Espoo.

3.RAKENTEET

ECCS. 2009. Publication N°:124, ECCS TC7 TWG 7.10, Connections in Cold-formed Steel Structures, The Testing of Connections with Mechanical Fasteners in Steel Sheetings and Sections.

EN 1990, Eurocode, Basis of structural design

EN1993-1-3 Annex A, Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, Annex A: Testing procedures

Haavisto J., 2012. TRT/2019/2012, FIXCEL®-teräskennorakenteiden liitoksissa käytettävien itseporautuvien ruuvien ulosveto- ja leikkauskokeet, Tampereen teknillinen yliopisto.

Lindberg N. 2013. TRT/2158/2013, Bridge behaviour of modular structure made of FIXCEL®-steel core panels, Tampere university of technology.

Lindberg N. 2013. TRT/2159/2013, FIXCEL® Floor element, Metal core panel of Neapo corporation, Vibration analysis, Bending tests, Tampere university of technology.

Lindberg N. 2013. TRT/2160/2013, FIXCEL® Wall element, Metal core panel of Neapo corporation, Axial load tests, Axial point load tests, Tampere university of technology.

Rantala J. 2011. TRT/1396/2011, Neapo Oy:n FIXCEL®-kennorakenneväliopohjien värähtelytarkastelut, Tampereen teknillinen yliopisto.

Toppila I. 2012. FIXCEL®-kennopalkin suunnittelu, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, luonnos 2012.

TRY. 2005. Teräsnormikortti Nro: 17/2005. Kävelystä aiheutuvat väliopohjien värähtelyt, Teräsrakenneyhdistys ry.

Yli-Sikkilä M., 2012. FIXCEL®-teräskennorakenteen toiminta ja kestävyys seinämäisenä palkkina, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto,

4.TALOTEKNIikka

Joutsu, J. & Kalema, T. 2012. Kennon talotekninen suunnittelu. Concels-projektin raportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Konstruktitekniikan laitos 108 s.

Joutsu, J. 2012. Uudet lasi- ja eristerakenteet. Concels-projektin raportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Konstruktitekniikan laitos 31 s.

Suomen rakentamismääräyskokoelma D3. 2012. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. Helsinki 2011.

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta. Luonnos 2012.

5.TOTEUTUS

5.1 MODUULIRAKENTAMISEN MENESTYSTEKIJÄT

Mediutiset. 2011. Jyväskylään kohoo moduulisairaala, Ilkka Jauhainen 5.12.2011

RT RakMK-210191. 1998. Valtion tukema asuntorakentaminen – Määräykset ja ohjeet 1998, Suomen rakentamismääräyskokoelma G2, Ympäristöministeriö, asunto- ja rakennusosasto

5.2 MODULAARINEN RAKENTAMINEN YRITYSVERKOSTON TOTEUTTAMANA

Arif, M.; Goulding, J. & Rahimian, F. P. 2012. Promoting Off-Site Construction: Future Challenges and Opportunities. Journal of Architectural Engineering. Vol. 18: 75-78.

Boyd, N.; Khalfan, M. M. A. & Maqsood, T. 2012. Off-Site Construction of Apartment Buildings: A Case Study. Journal of Architectural Engineering. Tulossa.

Hewage, K. & Ruwanpura, J. 2006. Carpentry Workers Issues and Efficiencies Related to Construction Productivity in Commercial Construction Projects in Alberta. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 33: 1075-1089.

Koskenvesa, A.; Koskela, L.; Tolonen, T. & Sahlstedt, S. 2010. Waste and Labor Productivity in Production Planning: Case Finnish Construction Industry. Proceedings of the 18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. 477-486.

Kähkönen, K; Karvonen, I. and Ollus, M. 2007. Modelling of Networked Construction Operations. Proceedings of the Second International Conference World of Construction Project Management.

Lawson, R. M.; Odgen, R. G. & Popo-Ola, S. 2011. Design Considerations for Modular Open Building Systems. Open House International. Vol. 36: 44-53.

McGraw-Hill Construction. 2011. Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry. SmartMarket Report. 52 s.

Schnaars, S. 2009. Forecasting the Future of Technology by Analogy – An Evaluation of Two Prominent Cases from the 20th Century. Technology in Society. Vol. 21: 187-195.

Sheffer, D. A. 2011. Innovation in Modular Industries: Implementing Energy-Efficient Innovations in US Buildings. PhD Thesis. Stanford University.

Steel Construction Institute. 2000. Value and Benefits Assessment of Modular Construction. Steel Construction Institute, UK.

Taj, S. & Berro, L. 2006. Application of Constrained Management and Lean Manufacturing in Developing Best Practices for Productivity Improvement in an Auto-Assembly Plant. International Journal of Productivity and Performance Management, Vol. 55: 332 – 345

Venables, T.; Barlow, J. & Gann, D. 2004. The Housing Forum. Manufacturing Excellence: UK Capacity in Offsite Manufacturing. 63 s.

5.3 ELINKAARINÄKÖKULMA

Koskela, S.; Korhonen, M.-R.; Seppälä, J.; Häkkinen, T. & Vares, S. 2011. Materiaalinäkökulma rakennusten ympäristöarvioinnissa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 16/2011. 44 s.

RIL 239-2008. Talotekniikan reititysohje: Modulaarinen installaatiotekniikka. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 141 s.

Suomen rakentamismääräyskokoelma A4. 2000. Rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje, määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriö. Asunto- ja rakennusosasto.

Tampereen teknillinen yliopisto
PL 527
33101 Tampere

Tampere University of Technology
P.O.B. 527
FI-33101 Tampere, Finland

ISBN 978-952-15-3035-7 (sid.)
ISBN 978-952-15-3036-4 (PDF)
ISSN 1797-8904